Научная статья
УДК 621.383.523
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19205

# ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ ТРАНШЕИ ИЗ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КМОП-СОВМЕСТИМОГО ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

**Д. И. Долженко ✉, Е. Д. Леткиман**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ ddi.dev.94@gmail.com

**Аннотация.** В работе проведено моделирование технологических операций изготовления кремниевого лавинного фотодиода и расчет его выходных характеристик. В результате представлены значения его коэффициента умножения (49,5 – 62,3) и спектральной чувствительности (15,8 – 19,6 А/Вт) в зависимости от типа дефекта траншеи из диоксида кремния. Показано, что наибольшим образом на данные параметры влияют технологические дефекты, вызывающие сужение профиля траншеи (узкой щели) по направлению к ее дну, что приводит к снижению коэффициента умножения вплоть до 18%. Установлено, что зависимость усиления фотодиода от угла наклона стенки траншеи хорошо описывается линейной функцией. Показано, что сужение траншеи вызывает увеличение латеральной компоненты напряженности электрического поля вблизи этой траншеи, что снижает значение пробивного напряжения и не увеличивает коэффициент умножения исследуемого фотодиода.

**Ключевые слова:** лавинный фотодиод, коэффициент умножения, спектральная чувствительность, технологические дефекты, STI, TCAD

**Для цитирования:** Долженко Д. И., Леткиман Е. Д. Влияние профиля траншеи из диоксида кремния на фоточувствительность КМОП-совместимого лавинного фотодиода видимого диапазона // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 2. С. 57–67. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19205

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Original article
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19205

# THE INFLUENCE OF A SILICA TRENCH PROFILE ON THE PHOTOSENSITIVITY OF A CMOS-COMPATIBLE AVALANCHE PHOTODIODE IN THE VISIBLE RANGE

**D. I. Dolzhenko ✉, E. D. Letkiman**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ ddi.dev.94@gmail.com

**Abstract.** This work has involved the simulation of technological operations of manufacturing a silicon (Si) avalanche photodiode and calculating its output characteristics. As a result, the values of its multiplication factor (from 49.5 to 63.3) and spectral sensitivity (from 15.8 to 19.6 A/W) depending on the shallow trench insulation defect type are presented for a Si avalanche photodiode. It has been shown that the technological defects causing narrowing of the width of the trench towards its bottom have the greatest impact on these parameters. As a result, the multiplication factor decreases to 18%. The dependence of the photodiode gain on the trench's wall inclination angle was established to be described well by a linear function. It

© Долженко Д. И., Леткиман Е. Д., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

was also demonstrated that the trench narrowing led to an increase in the lateral component of the electric field strength near the groove, which reduced the breakdown voltage, but did not lead to an increase in multiplication.

**Keywords:** avalanche photodiode, multiplication factor, spectral sensitivity, technological defects, STI, TCAD

**For citation:** Dolzhenko D. I., Letkiman E. D., The influence of a silica trench profile on the photosensitivity of a CMOS-compatible APD in the visible range, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (2) (2026) 57–67. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19205

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## Введение

Использование КМОП-совместимых (КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) лавинных фотодиодов находит широкое применение в устройствах прецизионного позиционирования, оптической коммуникации, а также в системах LIDAR (устройства обнаружения и определения дальности с помощью света) [1 – 4]. Однако формирование катода и анода на поверхности кремниевой пластины приводит к ряду серьезных проблем, наиболее значимыми из которых являются поверхностные эффекты: неоднородность распределения электрического поля и поверхностные токи утечки [5]. Эти факторы могут вызывать не только резкое снижение коэффициента лавинного умножения во всем спектральном диапазоне, но и преждевременный поверхностный пробой пластины.

К одному из перспективных решений относится создание узкой траншеи (ширина составляет несколько микрометров) между катодом и анодом, заполненной оксидом кремния $SiO_2$ (узкощелевая изоляция, *англ.* Shallow Trench Isolation (STI)) [6]. Существует довольно большое число способов травления кремния, но как правило, чем сильнее анизотропия формируемого профиля, тем выше сложность технологической операции и требования к оборудованию.

При этом каждый подход имеет свои недостатки. Такая совокупность факторов далеко не всегда гарантирует требуемые распределение поля и пути ударной ионизации, а это отражается на значениях тока при заданном напряжении питания. Кроме того, создаются различные картины светового переотражения при засветке всей фоточувствительной зоны (или ее части под некоторым углом). Из описания сложившихся неблагоприятных условий следует формулировка цели настоящего исследования.

Цель данной работы – анализ влияния профиля траншеи, заполненной оксидом кремния, на поведение вольтамперных характеристик КМОП-совместимого лавинного фотодиода.

## Методика исследования и особенности кремниевой структуры лавинного фотодиода

Расчеты выходных характеристик и моделирование технологических операций изготовления лавинного фотодиода проводились с использованием пакета моделирования Sentaurus TCAD. Несмотря на ограничения формы фотошаблонов, мы рассматривали осесимметричную структуру (рис. 1), поскольку такой подход позволяет свести к минимуму краевые эффекты, что упрощает и делает однозначной интерпретацию получаемых результатов по распределению электрического поля. Концентрации донорной ($N_D$) и акцепторной ($N_A$) примесей, а также скорость изменения концентраций $\Delta N_D$ и $\Delta N_A$ вблизи *p–n*-перехода были подобраны таким образом, чтобы обеспечить достаточный наклон кривой вольтамперной характеристики (ВАХ) в линейном режиме [7]. Создание таких условий для концентраций имело целью наблюдать изменение поведения указанной кривой на всех ее участках.

© Dolzhenko D. I., Letkiman E. D., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

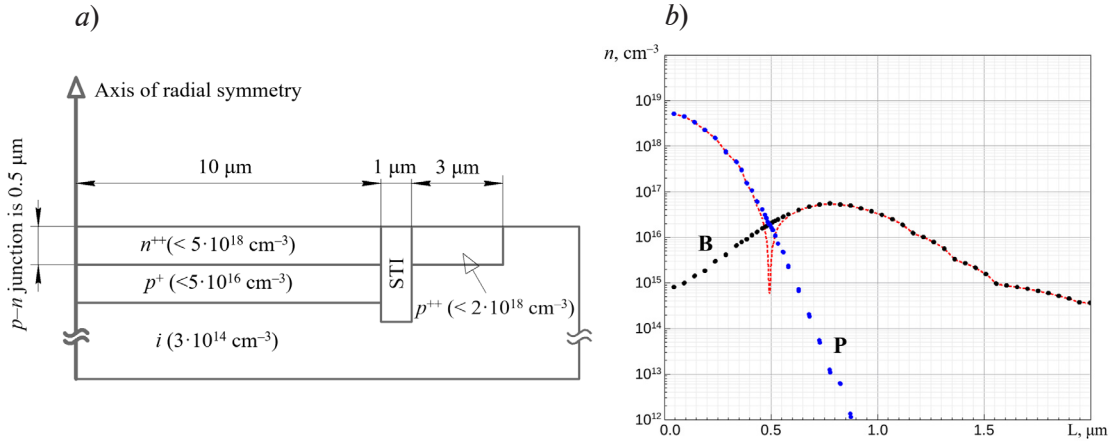



Рис. 1. Схематичное изображение радиального среза структуры (*a*) и график зависимостей концентрации легирующих примесей (бора и фосфора) от глубины в фоточувствительной области (*b*).
Красной кривой показана концентрация примеси без учета ее знака

При моделировании, в качестве профилей траншеи использовались наиболее часто встречающиеся структуры и сопутствующие дефекты, представленные на рис. 2. Соответствующие технологии изготовления этих структур приведены в табл. 1. Несмотря на то, что набор выбранных профилей далеко не исчерпан, он позволяет составить представление о тенденции развития лавины и формировании поля вблизи траншеи.

Ожидалось, что часть дефектов профилей STI не должна вносить существенных изменений в развитие лавины и значение коэффициента усиления, однако без моделирования невозможно произвести предварительную выборку, так как нереально учесть сразу несколько изменений в распределении электрического поля, ионизационного потенциала и подвижности носителей заряда.

Один из первых этапов моделирования широкого перечня структур – это оценка сеточной сходимости. Важно отметить, что для моделирования технологических процессов и физики полупроводникового устройства целесообразно использовать два типа сеток. Для моделей технологических операций удобна адаптивная сетка, шаг $a$ которой тем меньше, чем выше скорость изменения искомой величины $N_D$ по координате $x$, т.е. $1 / a \sim dN_D / dx$. Она демонстрирует высокую точность и экономию вычислительных ресурсов.

Для моделирования физики полученной структуры адаптивная сетка не подходит, так как размер ячейки стремительно нарастает в глубине структуры, что приводит к значительной ошибке и, зачастую, к отсутствию сходимости решения, особенно в оптике. Таким образом, перед этапом моделирования выходных характеристик необходимо проводить перестроение сетки с минимальным шагом, с учетом анализа сеточной сходимости.

В качестве транспортной модели мы использовали классические уравнения дрейфа-диффузии, уравнение Пуассона для концентрации электронов и дырок, которые традиционно применяются в TCAD-моделировании полупроводниковых структур (*англ.* Technology Computer-Aided Design (TCAD)). Для описания механизмов генерации и рекомбинации был использован стандартный набор физических моделей, рекомендованный для моделирования кремниевых фотодиодов [16].

Для лавинного фотодиода крайне важно отметить способ оценки параметров самой лавины. Для кремниевой структуры пробивная напряженность электрического поля оценивалась по хорошо известной модели ионизации [16, 17]. Для этого вычислялись ионизационные интегралы для электронов и дырок, которые при пробое кремния становятся равными единице; применялись следующие уравнения:

$$\int_0^W \alpha_n \exp\left(-\int_x^W (\alpha_n - \alpha_p)dx'\right) dx = 1, \int_0^W \alpha_p \exp\left(-\int_x^W (\alpha_p - \alpha_n)dx'\right) dx = 1, \quad (1)$$

где $\alpha_n$, $\alpha_p$ – коэффициенты ионизации электронов и дырок, соответственно; $W$ – ширина области пространственного заряда; $x$, $x'$ – координаты для внешнего и внутреннего интегралов, соответственно.

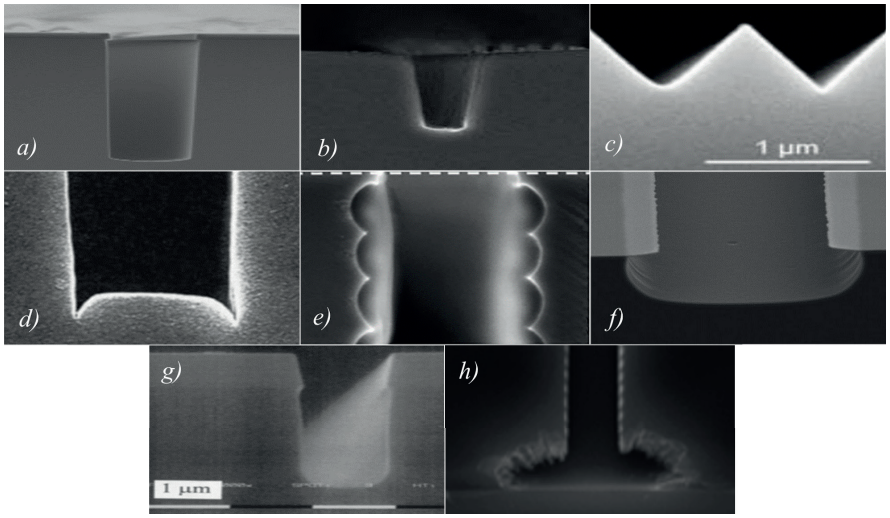



Рис. 2. Профили легирования с различным типом дефектов:
*a* – вертикальный, прямоугольный, анизотропный, с гладкими стенками;
*b* – трапециевидный, угол наклона стенок ≥ 80° (чаще всего); *c* – V-образный, с углом < 80°;
*d* – W-образный, анизотропный, с протравом у краев стенки; *e* – «скаллопированный»;
*f* – овальный, полусферический, изотропный; *g* – U-образный, анизотропный;
*h* – профиль с подтравом у дна канавки. Технологии изготовления см. в табл. 1

Таблица 1

**Технологии получения профилей легирования, приведенных на рис. 2**

| Позиция на рис. 2 | Технология | Источник |
|---|---|---|
| *a*) | Сухое травление (ICP-RIE) | [8] |
| *b*) | Сухое травление | [9] |
| *c*) | Влажное травление KOH | [10] |
| *d*) | Реактивное ионное травление (RIE) | [11] |
| *e*) | Сухое циклическое травление (BOSCH-процесс) | [12] |
| *f*) | Изотропное плазмохимическое травление $SF_6$ | [13] |
| *g*) | | [14] |
| *h*) | Реактивное ионное травление (RIE) | [15] |

В свою очередь ионизационные коэффициенты можно оценить из модели Ван Оверстратена – де Мана [18] на основе уравнений Чиновета [19], хорошо описывающей явление ионизации в диапазоне полей $(1 – 6)\cdot10^5$ В/см вблизи значения напряженности пробоя кремния:

$$\alpha_n(x) = \gamma\alpha_n \exp\left(-\frac{\gamma b_n}{E(x)}\right),\ \alpha_p(x) = \gamma\alpha_p \exp\left(-\frac{\gamma b_p}{E(x)}\right), \quad (2)$$

где $\alpha_n$, $\alpha_p$, $b_n$, $b_p$ – эмпирические коэффициенты модели, отражающие скорость ионизации; $E(x)$ – локальная напряженность электрического поля; $\gamma$ – фононная поправка на температуру.

В работе использовались следующие значения коэффициентов:

$$\alpha_n = 7{,}03\cdot10^5 \text{ см}^{-1},\ \alpha_p = (6{,}71 – 15{,}82)\cdot10^5 \text{ см}^{-1};$$

$$b_n = 1{,}231\cdot10^6 \text{ В/см},\ b_p = (1{,}693 – 2{,}036)\cdot10^6 \text{ В/см}.$$

Выбор значений $\alpha_p$ и $b_p$ из интервалов зависел от величины $E(x)$.

Фононная поправка на температуру следует выражению

$$\gamma = \tanh\left(\frac{\hbar\omega}{2kT_0}\right) \Big/ \tanh\left(\frac{\hbar\omega}{2kT}\right), \qquad (3)$$

где $\hbar\omega$ – энергия фононов ($\hbar\omega = 0{,}063$); $T_0$ – температура, для которой приведены эмпирические параметры.

## Полученные результаты и их обсуждение

При моделировании таких структур встает вопрос о геометрических параметрах профиля траншеи, для которого предстоит анализировать форму профиля. Ширина последнего обычно не превышает 1 мкм [20, 21], глубина STI является параметром варьируемым. Поэтому на первом этапе, помимо анализа сеточной сходимости, оценивалось влияние глубины профиля узкощелевой изоляции (STI) на вольтамперную характеристику лавинного фотодиода при прямоугольном профиле траншеи.

На обеих зависимостях рис. 3 видно, что на глубине траншеи $L < 3$ мкм наблюдается значительный спад коэффициента умножения $M$. Несмотря на уменьшение напряжения питания примерно на 10%, величина $M$ снижается примерно на 72%. Это объясняется тем, что, когда глубина STI, выполняющей роль охранного кольца, уменьшается, становится возможным латеральное протекание лавинных процессов. Профиль электрического поля все более смещается к поверхности, а латеральное электрическое поле вблизи поверхности (при малых значениях $L$) имеет напряженность в несколько раз выше, так как оно не ограничено канавкой с оксидом кремния.

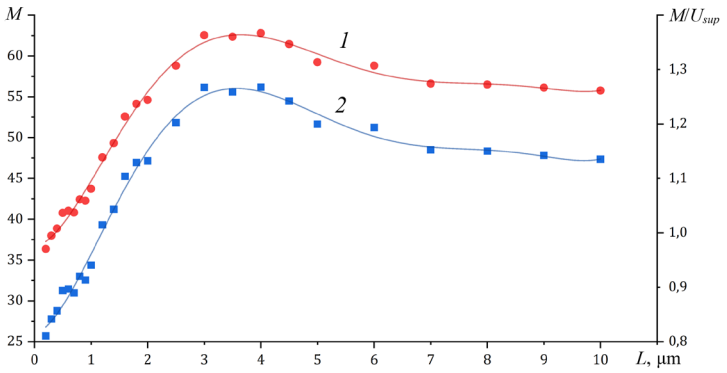



Рис. 3. График зависимости коэффициента умножения $M$ (*1*) и его же значений, нормированных на величину напряжения питания, $M/U_{sup}$ (*2*), от глубины STI-профиля.
Питающее напряжение $U_{sup} = 0{,}98U_{br}$ ($U_{br}$ – пробивное напряжение)

При $L > 4$ мкм начинается постепенный спад коэффициента умножения $M$. При увеличении глубины поле становится более вытянутым, и при длине волны около 670 нм, на глубине 10 мкм интенсивность падает уже примерно на порядок. Вместе с тем происходит несущественное падение напряженности поля в области значений глубины менее 10 мкм, где поглощается наибольшая доля излучения (здесь оно значительнее ближе к зоне STI). При бóльших значениях глубины скорость изменения коэффициента $M$ будет постепенно нарастать. Однако важно отметить, что моделирование бóльших глубин нецелесообразно, так как на практике это резко снижает число доступных методов травления, требуя высокого аспектного соотношения для профиля STI.

На втором этапе перейдем к моделированию профилей (ширина траншеи $W = 1$ мкм, глубина $L = 3$ мкм) с разным типом дефектов. Необходимо отметить, что реализация полностью изотропного варианта травления невозможна из-за неблагоприятного аспектного соотношения 3 : 1. На рис. 4 представлены ВАХ фототока и тока темновой проводимости. Видно, что наибольшее влияние на пробивное напряжение оказывает степень сужения по направлению ко дну STI-канавки, что ведет к усилению влияния латеральной компоненты поля на лавинный процесс. Остальные типы дефектов хотя и приводят к изменению

профиля поля вблизи края фоточувствительной зоны, но почти не влияют на пробивное напряжение.

Полученные значения коэффициента умножения и спектральной чувствительности приведены в табл. 2. Таким образом, дефекты, связанные с сужением ширины траншеи, могут приводить к падению величины $M$ вплоть до 18%.

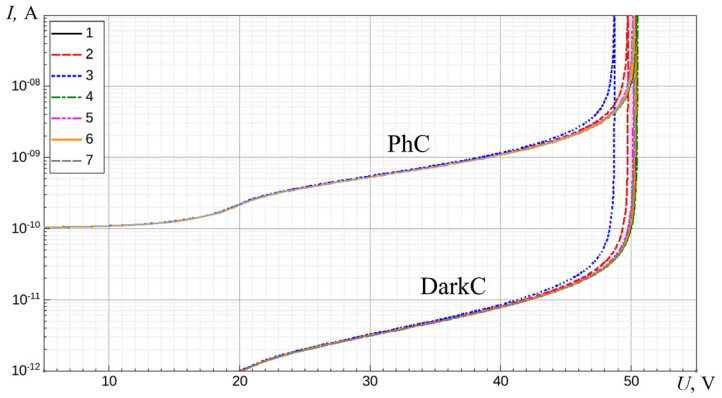



Рис. 4. Расчетные ВАХ фототока (PhC) и темнового тока (DarkC) при различных видах профиля STI и наличии его дефектов.
Номера кривых соответствуют типам профиля, приведенным в табл. 2

Таблица 2

**Значения ключевых параметров профиля STI для разных типов дефектов**

| Тип профиля | $S$, А/Вт | $M$ | $U_{br}$, В | $M/U_{sup}(0{,}98\ U_{br})$ |
|---|---|---|---|---|
| 1. Прямоугольный | 19,0 | 60,4 | 50,3 | 1,23 |
| 2. Трапециевидный | 18,2 | 57,3 | 49,7 | 1,18 |
| 3. V-образный | 15,8 | 49,5 | 48,6 | 1,04 |
| 4. W-образный | 19,6 | 62,3 | 50,4 | 1,26 |
| 5. Скаллопированный | 18,6 | 59,0 | 50,1 | 1,20 |
| 6. U-образный | 18,8 | 59,6 | 50,3 | 1,21 |
| 7. Подтрав у дна канавки | 18,6 | 59,4 | 50,2 | 1,21 |

Обозначения: $S$ – спектральная чувствительность на длине волны $\lambda = 670$ нм; $U_{br}$ – пробивное напряжение; $M$, $M/U_{sup}$ – соответственно ненормированный коэффициент умножения и нормированный на величину напряжения питания $U_{sup}$; $U_{sup} = 0{,}98 U_{br}$.

Для $W$-образного типа дефекта значения практически идентичны идеализированному прямоугольному профилю, так как формирование двух углублений вблизи стенок канавки может приводить к локальному увеличению ее глубины вплоть до 4 мкм. А согласно данным, представленным на рис. 3, величина коэффициента умножения $M$ в диапазоне 3 – 4 мкм практически остается неизменной.

На третьем этапе было проанализировано влияние сужения профиля у дна канавки на коэффициент умножения. На рис. 5 представлен график зависимости коэффициента умножения и спектральной чувствительности от ширины траншеи у дна канавки $W_b$. Зависимости хорошо ложатся на прямые аппроксимирующие линии:

$$y_1 = 10{,}3498\ x_1 + 50{,}2300,\ R_1^2 = 0{,}9786 \text{ (для } M),$$

$$y_2 = 2{,}9825\ x_2 + 16{,}0922,\ R_2^2 = 0{,}9728 \text{ (для } S).$$

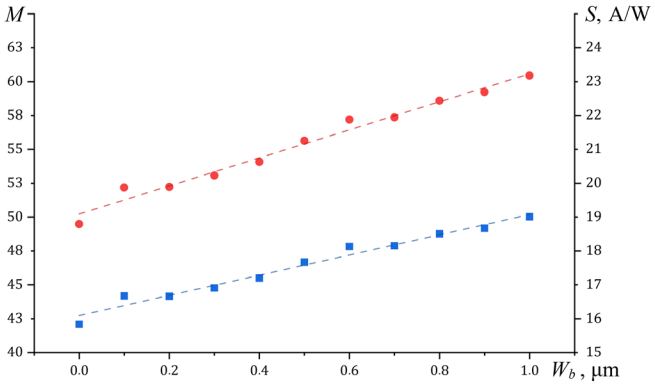



Рис. 5. Зависимости коэффициента умножения $M$ (красные символы) и спектральной чувствительности $S$ (синие символы) от ширины траншеи $W_b$ у дна канавки. Аппроксимирующие прямые показаны пунктирными линиями

Полученные зависимости $M(W_b)$ и $S(W_b)$ можно переписать в виде других линейных функций, связанных с изменением ширины канавки:

$$M(W_b) = M(W_{b(\max)}) - x_1 \Delta W_b,\ S(W_b) = S(W_{b(\max)}) - x_2 \Delta W_b, \quad (4)$$

где $W_{b(\max)}$, мкм, – максимальная ширина у дна канавки (прямоугольный профиль траншеи); $\Delta W_b$, мкм, – отклонение ширины канавки у дна от ширины дна прямоугольного профиля; $x_1$, $x_2$ – коэффициенты линеаризации для величин $M$ и $S$, соответственно ($x_1 \approx 10, x_2 \approx 3$).

На рис. 6 представлены графики зависимости модуля напряженности электрического поля и ее латеральной компоненты от глубины профиля STI.

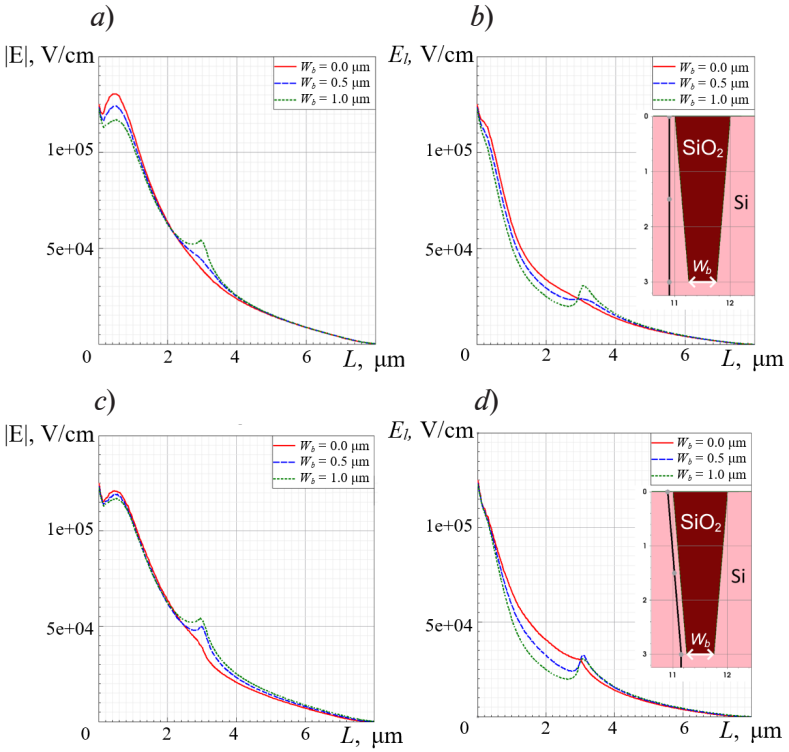



Рис. 6. Зависимости модуля напряженности электрического поля (*a*, *c*) и ее латеральной компоненты (*b*, *d*) от глубины STI-профиля для трех значений ширины дна $W_b$ и разных позиций относительно границ STI (направления указывают черные отрезки на вставках): *b* – 0,1 мкм по перпендикуляру к верхней границе STI, *d* – вдоль линии, параллельной боковой границе STI с зазором 0,1 мкм ($L < 3$ мкм) и перпендикулярно поверхности ($L > 3$ мкм). $U_{sup} = 40$ В

Видно, что для латеральной компоненты напряженности поля вдоль выбранной оси при глубинах менее 3 мкм, где свет обладает наибольшей интенсивностью, значение напряженности электрического поля выше у зауженного профиля. Это приводит к тому, что при критической напряженности электрического поля возрастает вклад ионизационных процессов, протекающих в латеральном направлении, что инициирует преждевременный пробой лавинного фотодиода.

## Заключение

В работе были изучены КМОП-совместимые структуры лавинных фотодиодов с узкощелевой изоляцией (STI) в виде охранного кольца. При напряжении питания $U_{sup} = 0{,}98U_{br}$ ($\lambda$ = 670 нм), путем моделирования технологических операций и выходных характеристик лавинного фотодиода были получены следующие значения ключевых характеристик: коэффициент умножения $M$ = 62,3, спектральная чувствительность $S$ = 19,6 А/Вт.

При ширине профиля траншеи $SiO_2$ около 1 мкм оптимальной глубиной, как показали расчеты, является значение порядка 3 – 4 мкм, что исключает методы одностадийного изотропного травления кремния. В случае травления с аспектным отношением 1 : 1 падение величины $M$ может достигать 30%.

Установлено, что дефекты, влияющие на ширину профиля STI, направленные ко дну канавки, могут вызывать снижение коэффициента умножения $M$ до 18%. При остальных типах рассмотренных дефектов, отклонения значения $M$ от оптимума не превышают 2,5%.

Зависимости коэффициента умножения и спектральной чувствительности от ширины профиля у дна канавки хорошо аппроксимируются линейными функциями, связанными с отклонением от идеального профиля. Уменьшение коэффициента умножения при сужении ширины канавки связано с увлечением вклада латеральной составляющей напряженности электрического поля в области с наибольшей интенсивностью света.

В дальнейшем планируется направить наши исследования на анализ процессов, приводящих к снижению величины $W_b$, на необходимость перекалибровки модели, на изучение спектральных зависимостей, а также на возможности минимизации влияния такого рода технологических дефектов и отклонений на коэффициент умножения лавинного фотодиода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Joo J. E., Lee M. J., Park S. M.** A CMOS optoelectronic receiver IC with an on-chip avalanche photodiode for home-monitoring LiDAR sensors // Sensors. 2021. Vol. 21. No. 13. P. 4364.

2. **Wu Q., Li Y., Yang Y., Chen S., Zhao Y.** The law that guides the development of photolithography technology and the methodology in the design of photolithographic process // Proceedings of the 2020 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC). June 26–July 17, 2020, Shanghai, China, IEEE, 2020. Pp. 3–8.

3. **Furtado A. S., Diniz J. A., Monteiro D. W. D. L.** Fabrication and characterization of active pixel sensors (APS) using simple metal gate nMOS technology // ECS Transactions. 2009. Vol. 23. No. 1. P. 461.

4. **Goy J., Courtois B., Karam J. M., Pressecq F.** Design of an APS CMOS image sensor for low light level applications using standard CMOS technology // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2001. Vol. 29. No. 1–2. Pp. 95–104.

5. **Kamrani E., Lesage F., Sawan M.** Efficient premature edge breakdown prevention in SiAPD fabrication using the standard CMOS process // Semiconductor Science and Technology. 2013. Vol. 28. No. 4. P. 045008.

6. **Zhi W., Quan Q., Yu P., Jiang Y.** A 45 nm CMOS avalanche photodiode with 8.4-GHz bandwidth // Micromachines. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 65.

7. **Williams G. M., Huntington A. S.** Probabilistic analysis of linear mode vs. Geiger mode APD FPAs for advanced LADAR enabled interceptors // Howart R. T., Richards R. D. (Eds.). Spaceborne Sensors III. Proceedings SPIE. 2006. Vol. 6220. 30 May. P. 622008.

8. **Zhang Y., Wu Y., Sun Q., Shen L., Lan J., Guo L., Shen Zh., Wang X., Xiao J., Xu J.** Inductively coupled plasma dry etching of silicon deep trenches with extremely vertical smooth sidewalls used in micro-optical gyroscopes // Micromachines. 2023. Vol. 14. No. 4. P. 846.

9. **Li L., Zhao X., Wong C.-P.** Charge transport in uniform metal-assisted chemical etching for 3D high-aspect-ratio micro-and nanofabrication on silicon // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2015. Vol. 4. No. 9. Pp. P337–P346.

10. **Frühauf J., Krönert S.** Wet etching of silicon gratings with triangular profiles // Microsystem Technologies. 2005. Vol. 11. No. 12. Pp. 1287–1291.

11. **Hoekstra R. J., Kushner M. J., Sukharev V., Schoenborn P.** Microtrenching resulting from specular reflection during chlorine etching of silicon // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1998. Vol. 16. No. 4. Pp. 2102–2104.

12. **Chang B., Leussink P., Jensen F., Hübner J., Jansen H.** DREM: Infinite etch selectivity and optimized scallop size distribution with conventional photoresists in an adapted multiplexed Bosch DRIE process // Microelectronic Engineering. 2018. Vol. 191. 5 May. Pp. 77–83.

13. **Panduranga P., Abdou A., Ren Zh., Pedersen R. H., Nezhad M. P.** Isotropic silicon etch characteristics in a purely inductively coupled SF6 plasma // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2019. Vol. 37. No. 6. P. 061206.

14. **Burtsev A., Li Y. X., Zeijl H. W., Beenakker C. I. M.** An anisotropic U-shaped SF6-based plasma silicon trench etching investigation // Microelectronic Engineering. 1998. Vol. 40. No. 2. Pp. 85–97.

15. **Laermer F., Urban A.,** Milestones in deep reactive ion etching // Digest of technical papers (Vol. 2) of the 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS'05), Seoul, Korea (South), 05–09 June, 2005. IEEE. 2005, Pp. 1118–1121.

16. **Hofbauer M., Schneider-Hornstein K., Zimmermann H.,** Single-photon detection for data communication and quantum systems. Bristol (UK): IOP Publishing, 2053–2563, 2021.

17. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. М.: Рипол Классик, 1973. 655 с.

18. **Van Overstraeten R., De Man H.** Measurement of the ionization rates in diffused silicon *p–n* junctions // Solid State Electronics. 1970. Vol. 13. No. 5. Pp. 583–608.

19. **Chynoweth A. G.** Ionization rates for electrons and holes in silicon // Physical Review. 1958. Vol. 109. No. 5. Pp. 1537–1540.

20. **Lee M.-J., Choi W.-Y.** Performance optimization and improvement of silicon avalanche photodetectors in standard CMOS technology // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2017. Vol. P-P. 20 September. Pp. 1–1.

21. **Wang W., Zeng H.-A., Wang F., Wang G., Xie Y., Feng Sh.** A speed-optimized, low-noise APD with 0.18 μm CMOS technology for the VLC applications // Modern Physics Letters B. 2020. Vol. 34. No. 29. P. 2050321.

## REFERENCES

1. **Joo J. E., Lee M. J., Park S. M.,** A CMOS optoelectronic receiver IC with an on-chip avalanche photodiode for home-monitoring LiDAR sensors, Sensors. 21 (13) (2021) 4364.

2. **Wu Q., Li Y., Yang Y., et al.,** The law that guides the development of photolithography technology and the methodology in the design of photolithographic process, Proc. 2020 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), Jun 26–Jul 17, 2020, Shanghai, China, IEEE, (2020) 3–8.

3. **Furtado A. S., Diniz J. A., Monteiro D. W. D. L.,** Fabrication and characterization of active pixel sensors (APS) using simple metal gate nMOS technology, ECS Trans. 23 (1) (2009) 461.

4. **Goy J., Courtois B., Karam J. M., Pressecq F.,** Design of an APS CMOS image sensor for low light level applications using standard CMOS technology, Analog Integr. Cir. Sig. Proc. 29 (1) (2001) 95–104.

5. **Kamrani E., Lesage F., Sawan M.,** Efficient premature edge breakdown prevention in SiAPD fabrication using the standard CMOS process, Semicond. Sci. Technol. 28 (4) (2013) 045008.

6. **Zhi W., Quan Q., Yu P., Jiang Y.,** A 45 nm CMOS avalanche photodiode with 8.4-GHz bandwidth, Micromachines. 11 (1) (2020) 65.

7. **Williams G. M., Huntington A. S.,** Probabilistic analysis of linear mode vs. Geiger mode APD FPAs for advanced LADAR enabled interceptors, In book: Howart R. T., Richards R. D. (Eds.) "Spaceborne Sensors III", Proc. SPIE. 6220 (30 May) (2006) 622008.

8. **Zhang Y., Wu Y., Sun Q., et al.,** Inductively coupled plasma dry etching of silicon deep trenches with extremely vertical smooth sidewalls used in micro-optical gyroscopes, Micromachines.14 (4) (2023) 846.

9. **Li L., Zhao X., Wong C. P.,** Charge transport in uniform metal-assisted chemical etching for 3D high-aspect-ratio micro-and nanofabrication on silicon, ECS J. Solid State Sci. Technol. 4 (9) (2015) P337–P346.

10. **Frühauf J., Krönert S.,** Wet etching of silicon gratings with triangular profiles, Microsyst. Technol.11 (12) (2005) 1287–1291.

11. **Hoekstra R. J., Kushner M. J., Sukharev V., Schoenborn P.,** Microtrenching resulting from specular reflection during chlorine etching of silicon, J. Vac. Sci. Technol. B. 16 (4) (1998) 2102–2104.

12. **Chang B., Leussink P., Jensen F., et al.,** DREM: Infinite etch selectivity and optimized scallop size distribution with conventional photoresists in an adapted multiplexed Bosch DRIE process, Microelectron. Eng. 191 (5 May) (2018) 77–83.

13. **Panduranga P., Abdou A., Ren Zh., et al.,** Isotropic silicon etch characteristics in a purely inductively coupled SF6 plasma, J. Vac. Sci. Technol. B. 37 (6) (2019) 061206.

14. **Burtsev A., Li Y. X., Zeijl H. W., Beenakker C. I. M.,** An anisotropic U-shaped SF6-based plasma silicon trench etching investigation, Microelectron. Eng. 40 (2) (1998) 85–97.

15. **Laermer F., Urban A.,** Milestones in deep reactive ion etching, In book: Digest of technical papers of the 13th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators & Microsyst., Seoul, Korea (South), 05–09 June, 2005. TRANSDUCERS'05, IEEE. 2 (2005) 1118–1121.

16. **Hofbauer M., Schneider-Hornstein K., Zimmermann H.,** Single-photon detection for data communication and quantum systems, IOP Publishing, 2053–2563, Bristol (UK), 2021.

17. **Sze S. M., Yiming Li, Ng K. K.,** Physics of semiconductor devices, Second Ed., Wiley, New York, 1981.

18. **Van Overstraeten R., De Man H.,** Measurement of the ionization rates in diffused silicon *p–n* junctions, Solid State Electron.13 (5) (1970) 583–608.

19. **Chynoweth A. G.,** Chynoweth, ionization rates for electrons and holes in silicon, Phys. Rev. 109 (5) (1958) 1537–1540.

20. **Lee M. J., Choi W. Y.,** Performance optimization and improvement of silicon avalanche photodetectors in standard CMOS technology, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. P-P (20 Sept) (2017) 1–1.

21. **Wang W., Zeng H.-A., Wang F., et al.,** A speed-optimized, low-noise APD with 0.18 μm CMOS technology for the VLC applications, Mod. Phys. Lett. B, 34 (29) (2020) 2050321.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДОЛЖЕНКО Дмитрий Игоревич** – *кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Высшей школы электроники и микросистемной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург. Россия.*

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

ddi.dev.94@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5707-4145

**ЛЕТКИМАН Егор Дмитриевич** – *студент Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.*

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

letkiman.egor@gmail.com

## THE AUTHORS

**DOLZHENKO Dmitry I.**
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
ddi.dev.94@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5707-4145

**LETKIMAN Egor D.**
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
letkiman.egor@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 11.12.2025. Одобрена после рецензирования 26.12.2025. Принята 02.02.2026.*
*Received 11.12.2025. Approved after reviewing 26.12.2025. Accepted 02.02.2026.*

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026