

К. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, к. т. н. В. В. РЮХТИН,
А. Б. ШИМАНОВСКИЙ

Украина, г. Черновцы, ОАО «ЦКБ Ритм»
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

Дата поступления в редакцию
19.03 2001 г.
Оппонент д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ

КРЕМНИЕВЫЕ $p-n$ -ФОТОДИОДЫ ДЛЯ БЛИЖНЕЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Разработанные фотодиоды имеют высокий уровень токовой монохроматической чувствительности в области УФ-излучения до 190 нм.

Интерес к приемникам ультрафиолетового (УФ) излучения в настоящее время обусловлен появлением стабильных и достаточно мощных источников этого излучения. С их помощью стало возможным решение большого количества прикладных задач в различных областях науки и техники.

В большинстве случаев полупроводниковые фотоприемники (ФП) УФ-излучения (УФФП) имеют очевидные преимущества по сравнению с другими их типами [1, с. 107]. Так, термопары и пироэлектрические ФП имеют низкие значения быстродействия и чувствительности. Лучшими частотными характеристиками обладают фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и фотоэлементы. Однако им присущи и некоторые недостатки: высокое рабочее напряжение, неудовлетворительные массогабаритные характеристики, неравномерность чувствительности по фоточувствительной поверхности, высокая стоимость.

Отсутствие внутреннего усиления у полупроводниковых УФФП компенсируется возможностью применения высококачественных операционных усилителей, а снижение быстродействия при этом оправдывается тем, что аналитические приборы используются на частотах до 3 кГц. Кроме того, полупроводниковые УФФП имеют значительные преимущества в надежности.

Среди полупроводниковых УФФП неоспоримыми преимуществами перед фоторезисторами обладают фотодиоды (ФД). Для них характерны высокая быстродействие, большой динамический диапазон детектируемой мощности, временная стабильность, а также простота включения в схему усиления.

УФФД с $p-n$ -переходом на основе кремния обладают определенными преимуществами по сравнению с ФД иной конструкции на основе кремния и других материалов. Это связано с тем, что приемники этого типа обладают значительными достоинствами, присущими им в комплексе:

- высокая стабильность ФД в УФ-области;
- высокие значения порога чувствительности;
- достаточно широкий диапазон чувствительности в УФ-области (190–380 нм);

- очень слабое снижение УФ-чувствительности с ростом температуры (не более 0,2 %/°С);
- широкий диапазон спектральной чувствительности в длинноволновой области спектра (до 1100 нм по уровню 10%);
- широкий динамический диапазон детектируемых мощностей (не менее 6 порядков).

Особенности конструирования кремниевых УФФД

Создание кремниевого ФД с высокой чувствительностью в УФ-области спектра требует решения сложного комплекса конструкторско-технологических проблем, связанных с особенностями поглощения УФ-излучения в кремнии, генерации носителей заряда поглощенным излучением, рекомбинации носителей на поверхности кристалла и в его объеме [2, 3].

Чувствительность ФД зависит как от физических ограничений, связанных с выбором материала для его получения, так и от конструкции фотоприемника. Для ее увеличения необходимо уменьшать отражение падающего оптического излучения от поверхности кристалла ФД и увеличивать коэффициент собирания носителей заряда. Создание просветляющего покрытия в виде термически выращенного слоя двуокиси кремния на поверхности фоточувствительного элемента кристалла способствует уменьшению отражения от его поверхности. В частности, для длины волны $\lambda=0,2$ мкм минимум отражения обеспечивается при толщине просветляющего слоя 0,07 мкм.

Генерационно-рекомбинационные процессы, происходящие в приповерхностной области кремниевого УФ-фотодиода, проиллюстрированы моделью ее зонной структуры, схематически изображенной на **рис. 1**.

Приповерхностная область представлена слоем p^+ -типа проводимости, полученного диффузией бора в подложку n -типа проводимости для формирования $p-n$ -перехода. Если оптическое излучение поглощается в p^+ -области, то одна часть фотогенерированных неосновных носителей диффундирует к $p-n$ -переходу, разделяется им и создает фототок. Другая часть диффундирует к поверхности и рекомбинирует через поверхностные уровни, что приводит к уменьшению коэффициента собирания. При наличии тянущего поля U в p^+ -области, обусловлен-

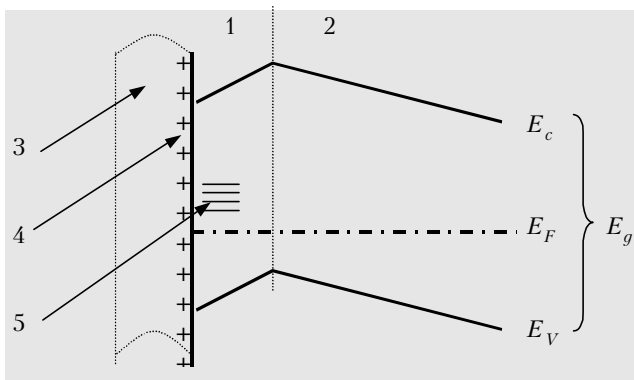


Рис. 1. Зонная структура приповерхностной диффузионной области (p^+ -типа) кремниевого УФ-фотодиода: 1 – приповерхностный барьерный слой; 2 – участок тянущего поля; 3 – просветляющее покрытие (SiO_2); 4 – положительный заряд в двуокиси кремния; 5 – поверхностные рекомбинационные уровни; E_c – дно зоны проводимости; E_F – уровень Ферми; E_v – граница валентной зоны; E_g – запрещенная зона

ного наличием градиента концентрации легирующей примеси, более предпочтительным для неосновных носителей в p^+ -области является движение к $p-n$ -переходу. При этом происходит повышение коэффициента собирания. Для электронов, генерированных в барьерном слое 1 p^+ -области, коэффициент собирания носителей уменьшается. Это связано с тем, что им необходимо преодолевать потенциальный барьер возле поверхности. Наличие барьера обусловлено положительным зарядом в окисле и понижением концентрации бора вследствие частичного вытеснения его кристаллической решеткой в слой двуокиси кремния при термическом выращивании просветляющего покрытия.

Задача повышения коэффициента собирания фотогенерированных носителей заряда сводится к уменьшению рекомбинации носителей через рекомбинационные уровни на поверхности и в p^+ -области. Это связано с тем, что поглощение УФ-излучения в кремниевом кристалле происходит на очень малой глубине, непосредственно возле его поверхности.

Для длинноволновой границы ультрафиолетового излучения ($\lambda=380$ нм) коэффициент поглощения равен $1,9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, и уменьшение интенсивности в e раз, согласно закону Бугера – Ламберта – Бера, происходит на глубине 50 нм. На глубине до 240 нм 99% этого излучения поглощается. С уменьшением длины волны излучения коэффициент поглощения увеличивается и, например, для $\lambda=300$ нм 99% излучения поглощается на глубине до 50 нм [4, с. 347].

Уменьшение рекомбинации носителей заряда на поверхности кристалла и в приповерхностном слое, в котором происходит поглощение УФ-излучения, достигается в общем известными способами, оптимизированными для данного типа фотоприемника. Для обеспечения максимального сбора фотогенерированных носителей заряда уменьшена толщина барьерного слоя, а $p-n$ -переход приближен к поверхности кристалла на 0,2 мкм.

Результаты разработки кремниевых УФФД

Задачи, сформулированные выше, были успешно решены в ОАО «ЦКБ Ритм». Разработанные конструкции и технологии позволили наладить серийный выпуск кремниевых УФФД с $p-n$ -переходом «Квант» и «Квант-1».

Схематическое изображение разреза кристалла УФФД на основе кремния n -типа проводимости приведено на рис. 2. Малая глубина залегания $p-n$ -перехода у ФД способна приводить к увеличению их темновых токов. Устранение этого эффекта по периметру области выхода $p-n$ -перехода на поверхность (периметр фоточувствительного элемента) достигается на глубине залегания 1,5 мкм.

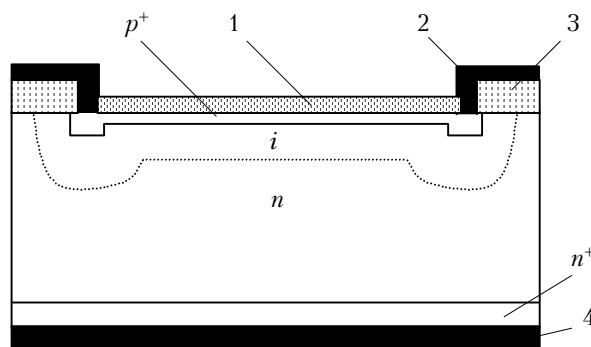


Рис. 2. Схематическое изображение разреза кристалла УФФД на основе кремния:

1 – просветляющее покрытие (двуокись кремния); 2 – металлический контакт к фоточувствительному элементу; 3 – защитное покрытие (двуокись кремния); 4 – металлический контакт к тыльной стороне кристалла; n – базовая область; n^+ – область, легированная фосфором; p^+ – область, легированная бором; i – область собственной проводимости

Легирование обратной стороны кристалла фосфором (n^+) и оптимальная форма контакта с фоточувствительным элементом (кольцо) позволили расширить динамический диапазон ФД до 6,5 порядков (от уровня темновых токов).

Достигнутый уровень параметров и характеристик лучших образцов ФД представлен в таблице.

Расширение области спектральной чувствительности ФД «Квант» и «Квант-1» до 190 нм достигнуто повышением концентрации бора в легированной p^+ -области до $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ по сравнению с $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ у ФД 288 и ФД 307. Это позволило значительно уменьшить толщину нежелательного барьерного слоя (см. рис. 1). Кроме того, для уменьшения рекомбинации носителей заряда в p^+ -области у ФД «Квант» и «Квант-1» глубина залегания $p-n$ -перехода уменьшена до 0,2 мкм по сравнению с 1,5 мкм у ФД 288 и ФД 307. При этом у первых двух ФД участок тянущего поля более крутой, что также способствует уменьшению рекомбинации в нем. Уменьшение рекомбинации в p^+ -области для ФД 288 достигается путем минимизации концентрации дефектов в ней.

По уровню чувствительности в УФ-области спектра ФД «Квант» и «Квант-1» соответствуют ана-

Тип фотодиода	Эффективная площадь фоточувствительного элемента, мм ²	Рабочая длина волны (λ_p), нм	Токовая монохроматическая чувствительность ($S_{I\lambda}$), А/Вт	Темновой ток (I_t), нА ($U=10$ мВ)	Примечание
ФД 288А	100,0	300	0,06	0,5	1, 2
ФД 288Б	100,0	300	0,06	0,5	1, 2, 3
ФД 288В	100,0	300	0,09	0,2	1, 2
ФД 307	38,0	300	0,06	0,1	4
ФД «Квант»	100,0	200	0,1	0,2	1, 5
ФД «Квант-1»	100,0	200	0,1	0,5	1, 5

1 — герметичный металлостеклянный корпус; 2 — лейкосапфировое входное окно; 3 — при поставке потребителям прилагается относительная спектральная характеристика чувствительности конкретного ФД; 4 — выполнен на ситалловой подложке; 5 — кварцевое входное окно.

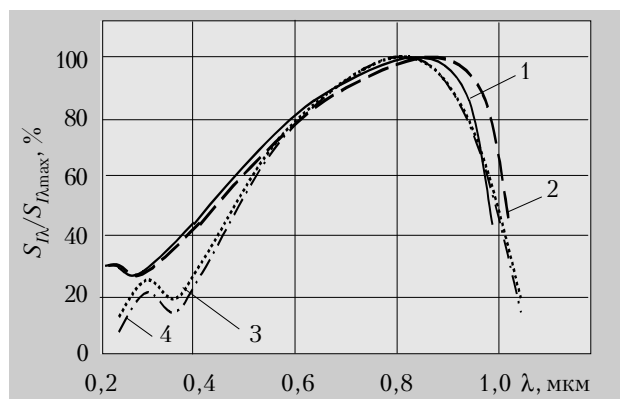


Рис. 3. Относительные спектральные характеристики чувствительности кремниевых УФФД: 1 — ФД «Квант»; 2 — ФД «Квант-1»; 3 — ФД 288В; 4 — ФД 288А, -Б, ФД 307

логичным ФП фирм «Hamamatsu» [5] (Япония), EG&G [6] (Канада), UDT (США). При этом цена отечественных фотодиодов значительно ниже.

У ФД 288 и ФД 307 возможно снижение чувствительности в УФ-области, но не более чем на 30% в течение 12 лет хранения, что типично для конструкции фоточувствительного кристалла с такой глубиной $p-n$ -перехода. Это связано с изменением заряда в окисле и возможным расширением барьерного слоя, а также с увеличением рекомбинации на поверхности, что увеличивает нежелательный ток на нее фотогенерированных носителей заряда. Плотность поверхностных состояний разработанных фотодиодов составляет $(4-5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Исследования ФД «Квант» и «Квант-1», проведенные во ВНИИ ОФИ (г. Москва, Россия), показали исключительно высокую стабильность этих приемников в УФ-области, в т. ч. после УФ-облучения дейтериевой лампой с эквивалентной мощностью 1 мВт на протяжении 5000 ч. Длительность наработки, снижающая чувствительность на 10% от первоначальной, равна 100000 ч.

Различие емкости ФД «Квант» и «Квант-1» объясняется использованием для изготовления кристал-

лов марок кремния с различным удельным сопротивлением: КЭФ7,5 — 7,5 Ом·см и КБ12-600Т — 600 Ом·см.

Быстродействие ФД в УФ-диапазоне ограничивается RC -составляющей и не является ограничительным фактором в системах, где используются данные фотоприемники.

УФФД можно использовать для детектирования оптического излучения вплоть до 1060 нм. Наиболее эффективны они в коротковолновой видимой области спектра из-за высокой чувствительности фотодиодов в этой области спектра. Типичные относительные спектральные характеристики чувствительности разработанных фотодиодов приведены на рис. 3.

Оптимальный режим включения ФД — фотогальванический (без подачи напряжения смещения на $p-n$ -переход). При необходимости возможно и фотодиодное включение.

Таким образом, разработанные фотодиоды по уровню чувствительности в УФ-области спектра не уступают аналогам ведущих мировых производителей при значительно меньшей их стоимости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И. Д. Анисимова, И. М. Викулин, Ф. А. Заитов, Ш. Д. Курмашев. — М.: Радио и связь, 1984.
2. Quchi H., Mukai T., Kaamei T., Okamura M. Photo diodes sensitive to ultraviolet radiation // IEEE. — 1979. — Vol. ED-26, N 12. — P. 1965 — 1969.
3. Verdebout J., Booker R. L. Degradation of native oxide passivated silicon photodiodes by repeated oxide bias // J. Appl. Phys. — 1984. — Vol. 55, N 2. — P. 406 — 412.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М: Мир, 1984, т. 2.
5. Hamamatsu Photodiodes. Cat. N KPD0001E06, Dec. 1997.
6. EG&G Optoelectronics. Short from catalog emitters and detectors, 1996, issue 1.