

06.2

Микроканальный лавинный фотоприемник на основе структуры Si-SiO₂

© М.А. Мусаев

Азербайджанская государственная нефтяная академия,
Баку, Азербайджан
E-mail: ihm@adna.baku.az

Поступило в Редакцию 23 мая 2002 г.

Предложен и реализован лавинный фотоприемник на базе микроканальной лавинной Si-SiO₂-структуры, являющийся адекватным, но более технологичным аналогом известных вакуумных микроканальных пластин. Установлено, что значительное увеличение коэффициента усиления фототока связано с уменьшением флуктуации напряжения пробоя полупроводника и локальным подавлением лавинного процесса в неоднородностях полупроводника, ответственных за микроплазменный пробой.

В последние годы значительно вырос интерес к разработке новых типов лавинных фотоприемников на основе кремниевых гетероструктур в связи с их высокой чувствительностью и потенциально более низкой стоимостью по сравнению с традиционными лавинными фотодиодами [1,2]. Наиболее существенные результаты получены на лавинных структурах Si-SiO₂ и Si-SiC, в которых осуществляется локальное подавление лавинного процесса [3-5]. Первые структуры имеют лучшие параметры только в режиме импульсного питания, а вторые могут работать как на импульсном, так и на постоянном напряжении благодаря наличию необходимой проводимости слоя SiC.

Как показано в работе [5], для достижения высоких параметров фотоприемника следует обеспечить, во-первых, полное блокирование инжекции носителей заряда со стороны металлического электрода, во-вторых, пространственную локализацию лавинного процесса. В данной работе предложена и реализована новая конструкция лавинной кремниевой структуры, в которой удачно выполняются указанные условия.

Предложенный фотоприемник изготовлен на базе кремниевой подложки *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением $\sim 1 \Omega \cdot \text{m}$. На подложке выращивался термический окисел кремния (SiO₂) толщиной

$\sim 500 \text{ \AA}$, в котором были вскрыты окна размерами $2 \times 2 \mu\text{m}$ и с интервалом $5 \mu\text{m}$. В этих окнах производилось ионное легирование фосфором с дозой $\sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ для создания матрицы $p-n$ -переходов глубиной $\sim 1 \mu\text{m}$. Затем на поверхности $p-n$ -переходов выращивался туннельно-тонкий окисел толщиной $\sim 25 \text{ \AA}$. Полупрозрачный титановый слой площадью $\sim 1 \text{ mm}^2$, сформированный на поверхности окислов, использовался в качестве полевого электрода. Для понимания особенностей предложенной структуры изготавливались также образцы обычных лавинных фотодиодов на базе единого плоскопараллельного $p-n$ -перехода.

Благодаря достаточной проводимости туннельно-тонкого окисла предложенный фотоприемник работает на постоянном напряжении питания. При этом на полупрозрачный электрод подается положительный относительно подложки потенциал величиной, достаточной для развития лавинного процесса в $p-n$ -переходах матрицы. Приложенный потенциал делится между окислом и кремниевой подложкой. Из-за малой толщины и достаточно высокой проводимости туннельно-тонкого окисла по сравнению с толстым окислом наибольшая величина напряженности поля, достаточной для развития лавинного процесса, всегда достигается в областях $p-n$ -переходов матрицы. Таким образом обеспечивается полная локализация лавинного процесса и носители заряда, созданные в процессе ударно-полевой ионизации, накапливаются на границе раздела кремний-туннельно-тонкий окисел и уменьшают (экранируют) электрическое поле в этой области полупроводника. После уменьшения поля до некоторого критического значения лавинный процесс в данном микроканале ($p-n$ -переходе) прекращается. При этом импульсный фотоотклик формируется в виде тока смещения через емкость диэлектрика структуры.

Основная особенность структур с матрицей $p-n$ -переходов в том, что коэффициент усиления фототока в них значительно выше по сравнению с базовыми структурами. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента усиления фототока от приложенного напряжения. Зависимости снимались при импульсной мощности излучения $\sim 4.4 \cdot 10^{-9} \text{ W}$. Длительность световых импульсов при этом составляла $\sim 100 \text{ ns}$.

В рабочем режиме к структуре прикладывалось напряжение V с полярностью, соответствующей обеднению границы раздела полупроводник-диэлектрик. В качестве источника света использовался светодиод с длиной волны излучения $\lambda \sim 650 \text{ nm}$. Коэффициент усиления лавинного

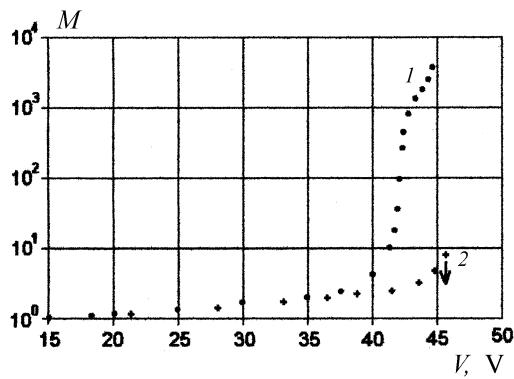


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления импульсного фототока от приложенного потенциала: 1 — микроканальная структура, 2 — базовая структура.

фотоприемника определялся как отношение амплитуды усиленного фототока при $V > 15$ В к амплитуде фототока при $V = 15$ В. Видно, что при напряжении $V = 44$ В коэффициент усиления фототока в структуре с p - n -матрицей (кривая 1) превышает более чем в 1000 раз коэффициент усиления фототока в базовой структуре с единым плоскопараллельным p - n -переходом. В базовой структуре не удается достичь высоких коэффициентов усиления из-за неограниченного роста лавинного тока на микронеоднородностях кремниевой подложки, шунтирующего всю рабочую площадь прибора.

Уменьшение напряжения пробоя микроканальной структуры с эффектом „острия“, осуществляемым в резких p - n -переходах. Дело в том, что после термической диффузии примесей через окна диаметром $\sim 2 \mu\text{m}$ в приповерхностной области подложки образуются p - n -переходы с формой границы раздела ближе к полусфере. При глубине диффузии примесей, сравнимой с величиной максимально возможной толщины W обеднения в подложке (в нашем случае $W \sim 1.8 \mu\text{m}$), эквипотенциальные поверхности электрического поля вокруг p - n -переходов имеют значительную кривизну, в результате этого там лавинный процесс достигается при меньшем потенциале по сравнению с базовой структурой, состоящей из плоскопараллельного p - n -перехода.

Установлено, что значительное увеличение коэффициента усиления фототока в структурах с областями n -типа проводимости достигается

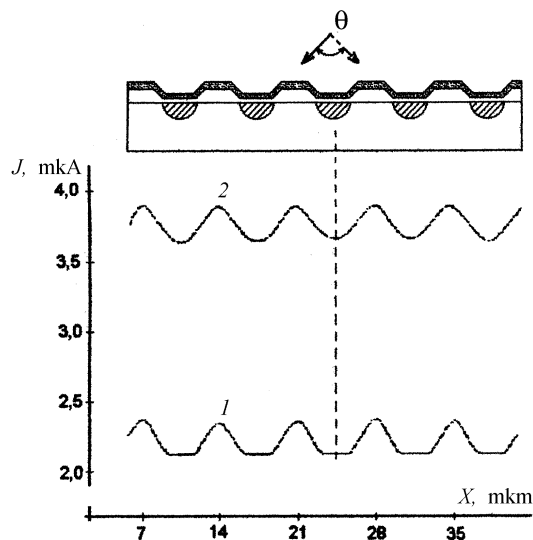


Рис. 2. Пространственная зависимость фототока в микроканальной лавинной структуре при коэффициенте усиления $M = 5000$. 1 — $E = 15$ keV, 2 — $E = 30$ keV.

благодаря двум причинам: во-первых, уменьшению флуктуации напряжения пробоя полупроводника после формирования на его поверхности полусферических резких $p-n$ -переходов [5], во-вторых, локальному (в пределах одного микро- $p-n$ -перехода) подавлению лавинного процесса в неоднородностях полупроводника, ответственных за микроплазменный пробой. Дело в том, что для перехода электронов из одной области n -типа проводимости в другую необходимо преодолеть потенциальный барьер высотой ~ 5 V, образованный за счет двух разных толщин окислов кремния.

Пространственная однородность лавинного процесса в микроканальной структуре исследовалась с помощью луча электронного микроскопа. Иницирующий лавину фототок в полупроводнике создавался электронным лучом, сканирующим рабочую площадь структуры. Диаметр электронного пучка не превышал $0.5 \mu\text{m}$. Фотоотклик регистрировался в виде осциллограммы, соответствующей единичному проходу электронного луча вдоль поверхности структуры (рис. 2). Обнаружено,

что периодичность осциллограммы фототока повторяет периодичность расположения маленьких p - n -переходов, причем наименьший сигнал наблюдается в тот момент, когда электронный луч находится в центре полусферических n -областей. Последнее связано с тем, что электронный луч часть своей энергии теряет внутри высоколегированной n -области. Несмотря на это, микроканальная лавинная структура имеет достаточно высокую однородность фотоотклика по рабочей площади. Например, при энергии электронного пучка $E = 30 \text{ keV}$ относительное отклонение фотоотклика по поверхности структуры не превышает 5% (см. кривую 2 на рис. 2).

Таким образом, предложен и реализован более технологичный лавинный фотоприемник на базе микроканальной лавинной Si-SiO_2 структуры, являющийся адекватным аналогом известных вакуумных микроканальных пластин. Предложенный фотоприемник может успешно применяться для регистрации сверхслабых световых потоков и гамма-квантов.

В заключение автор считает своим приятным долгом поблагодарить З.Я. Садыгова за помощь при изготовлении экспериментальных образцов.

Список литературы

- [1] Вуль А.Я., Дидейкин А.Т., Косарев А.И. // Письма в ЖТФ. 1990. В. 21. Т. 16. С. 15–18.
- [2] Садыгов З.Я., Сулейманов М.К., Бокова Т.Ю. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 7. С. 75–79.
- [3] Кравченко А.Б., Плотников А.Ф., Попов Ю.М., Шубин В.Э. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 1. С. 785–792.
- [4] Осипов В.В., Панкратов А.А., Холоднов В.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 6. С. 121–127.
- [5] Садыгов З.Я. Физические процессы в лавинных фотоприемниках на основе структуры кремний–широкозонный слой. Дис. на соис. учен. степ. докт. физ.-мат. наук. М.: МИФИ, 1997.