

гим преобразователям информации с собственными инерционностью и шумами.

Понимание природы источников и механизма формирования собственных шумов представляется необходимым для физического проектирования малозумящих полупроводниковых структур, в том числе многослойных. И тем более удивительно, что в течение полувека после публикаций А. Ван дер Зила, несмотря на неизменно растущий интерес к электронным и оптико-электронным компонентам с предельно малыми шумами, физические источники шумов токораспределения и механизм формирования белых шумов в полупроводниковых p - n -переходах оставались нерасшифрованными.

Автор признателен Генеральному директору ГНЦ РФ ФГУП «НПО "Орион"» профессору А. М. Филачеву за предоставленные возможности для исследовательской работы и профессору М. А. Трищенко за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. Курбатов Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — М.: Изд-во МФТИ, 1999. С. 147.
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003. С. 202.
3. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. — М.: Мир, 1979.
4. Лукьянчикова Н. Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. — М.: Радио и связь, 1990.
5. Spescha G., Strutt M.J. O.// Sci Electrica, 1959. V. 4. P. 121.
6. Рабинович А. И.// ЖЭТФ. 1968. Т. 54. С. 239.
7. Рабинович А. И.// Физика и техника полупроводников. 1969. № 3. С. 424.
8. Van der Ziel A.// Proc IRE. 1955. V. 43. P. 1639.
9. Van der Ziel A.// Ibid. 1957. V. 45. P. 1011.
10. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. — М.: ИИЛ, 1961.
11. Неустроев Л. Н., Осипов В. В.// Физика и техника полупроводников. 1981. Т. 15. С. 2186.
12. Таубкин И. И.// Успехи физических наук (2006). В печати.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2006 г.

About photoinduced and thermal noises in the semiconductor diodes

I. I. Taubkin

"Orion" Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Brief review of the literature devoted to the theory of thermal and photoinduced noises in the semiconductor diodes is presented. Coordinate and frequency dependencies of photoinduced currents and noises of a p^+ - n -junction were calculated taking into account the volume and surface recombination of the holes which were generated under local irradiation of the n -region. It is established, that noises in p^+ - n -junctions caused by the current distribution arise because of the fluctuations of the local hole recombination and diffusion rates in the n -region. Physical mechanism is opened of the forming of high-frequency thermal and photoinduced shot noises in the p - n -junctions.

УДК 621.382

Разработка алгоритмов моделирования процесса формирования P^{++} -, P^- -, P^+ -слоев двухпролетных лавинно-пролетных диодов со ступенчатым профилем легирования

А. Г. Шауцуков

Кабардино-Балкарский государственный университет, г. Нальчик, Россия

Г. Д. Кузнецов

Московский государственный институт стали и сплавов, Москва, Россия

На основе метода имплантации через пленки и метода многократного ионного легирования разработаны алгоритмы моделирования процесса формирования P^{++} -приконтакт-

ного слоя и P^+ - P -пролетного слоя двухпролетных лавинно-пролетных диодов (ЛПД) со ступенчатым профилем легирования. Проведен численный эксперимент по определению режима формирования P^{++} -, P -, P^+ -слоев двухпролетного ЛПД 4-мм диапазона со ступенчатым профилем легирования.

Известно, что двухпролетные ЛПД и особенно ЛПД со ступенчатым профилем легирования имеют существенные преимущества по сравнению с однопролетными. Параметры активной структуры таких ЛПД исключают возможность использования для ее формирования метода термической диффузии. Ее можно изготовить, используя метод многослойной эпитаксии или многократного легирования. В настоящее время метод газовой эпитаксии позволяет формировать эпитаксиальные слои с точностью по толщине и концентрации $\pm 20\%$. Кроме того, этот метод дает широкие переходные слои (15—30 % от толщины слоя). Большими возможностями при создании кремниевых эпитаксиальных структур для ЛПД обладает процесс молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Однако низкая производительность и дороговизна оборудования для МЛЭ сдерживает его широкое применение в производстве ЛПД.

В данной работе рассматривается моделирование процесса формирования P^+ - P -пролетной области методом многократного легирования и P^{++} -приконтактной области методом имплантации через пленки. При этом предполагается, что n^+ -, n -активная структура двухпролетного ЛПД со ступенчатым профилем легирования формируется на подложке методом эпитаксиального наращивания.

Теоретическая часть

При формировании тонких приконтактных P^{++} -слоев активной структуры ЛПД использование обычной имплантации ионов бора не представляется возможным. Частично проблему можно решить путем имплантации молекул BF_2 [1]. Применение процесса имплантации через пленки решает проблему в целом.

Для моделирования такого процесса теория ЛШШ неприемлема. Согласно работе [2] эту задачу можно решить, рассчитав относительные тормозные способности пленки кремния и заменив толщину пленки "эквивалентной толщиной" кремния. Однако такой подход неприемлем, если тормозные способности пленки и подложки значительно разнятся. В работе [3] представлено распределение в первом и втором случаях в виде двух состыкованных Гауссовых профилей. В работе [4] была предложена методика расчета профилей распределения ионов в подложке при бомбардировке структур пленка—подложка, основанная на определении спектра энергий ионов на границе пленка—подложка и последующем построении и

суммировании профилей распределения ионов для каждой выбранной энергии из спектра.

Алгоритмы моделирования процесса формирования P^{++} для ЛПД в данной работе разрабатывались на основе методики расчета профилей распределения ионов, внедренных в подложку при бомбардировке структур пленка—подложка, описанной в работе [4]. Согласно этой методике распределение ионов по глубине подложки для каждой энергии из спектра энергий на границе пленка—подложка оценивается с помощью симметричной функции распределения Гаусса. Как известно, это распределение определяется параметрами R_p и ΔR_p , которые в свою очередь зависят от пробега ионов (R). Согласно работе [5] связь между R и R_p определяется выражением $R/R_p = (1 + bM_2/M_1)$, где b – медленно меняющаяся функция энергии. В области энергий, где преобладает ядерное торможение, при $M_1 > M_2$ с хорошим приближением выполняется упрощенная формула $R/R_p = 1 + M_2/(3M_1)$. С ростом энергии b уменьшается. При $M_1 < M_2$ из-за рассеяния на большие углы различие между R_p и R становится более значительным, чем это следует из приведенного выше приближенного соотношения, но в этих случаях большую роль обычно играет электронное торможение, что часто компенсирует рост поправочного коэффициента. В итоге выражение $1 + M_2/(3M_1)$ оказывается неплохим эмпирическим приближением для поправки в широком диапазоне энергий и соотношений масс.

При исследовании процесса ионного легирования нас также интересует среднеквадратичный разброс пробегов ΔR_p . Согласно Линхарду и др. приведенный относительный разброс $\Delta R/R_p = (M_1 + M_2)/[2(M_1M_2)^{1/2}]$ близок к постоянной величине 0,35. Анализ экспериментальных значений величины $(\Delta R/R_p)^2$, проведенный в работе [6], показывает, что более точным асимптотическим приближением является величина, близкая к 0,45. Таким образом, полуширину ($2,5 \Delta R_p$) Гауссова распределения во многих случаях можно приближенно оценить по формуле $2,5 \Delta R_p \approx 1,1 R_p 2(M_1M_2)^{1/2} / (M_1 + M_2)$.

Однако рассмотренные выше расчеты R_p и ΔR_p в теории ЛШШ достаточно сложны. Для инженерных расчетов целесообразно воспользоваться имеющимися таблицами параметров пространственного распределения ионно-имплантированной примеси.

На основании вышесказанного были разработаны алгоритмы моделирования процесса формирования заданного тонкого P^{++} -слоя активной структуры ЛПД. Алгоритмы предусматривают построение профилей распределения бомбардирующих ионов в подложке для ряда доз и энергий и сравнение каждого профиля легирования с заданным. Проводится сравнение концентраций внедренной примеси на поверхности и на глубине, равной толщине P^{++} -слоя. На этой глубине она должна быть равна исходной концентрации легирующей примеси в подложке.

Конструкция ЛПД предполагает равномерное распределение легирующей примеси в пролетных областях ЛПД. Использование метода многократной ионной имплантации для их формирования предполагает дискретное применение энергии и доз внедрения, обеспечивающее формирование необходимого профиля легирования. В основу алгоритма моделирования положен следующий принцип: сумма профилей легирования каждой имплантации должны соответствовать заданному профилю.

При моделировании процесса формирования P^+ — P -пролетной области, естественно, энергию первого легирования выбрать равной энергии, для которой проектный пробег ионов равнялся бы координате $1/2$ толщины P^+ -слоя. Определив ΔR_p , соответствующий выбранной энергии, можно определить дозу первого легирования по формуле $D = N\sqrt{2\pi} \Delta R_p$, где N — концентрация P -примеси, равная сумме концентрации n -примеси в исходной подложке и требуемой концентрации P -примеси в P^+ -слое.

Энергию и дозу второго легирования необходимо выбрать таким образом, чтобы концентрация в максимуме профиля легирования была равна сумме концентраций n -примеси в подложке и необходимой концентрации P -примеси в P -пролетном слое, а в точке пересечения профилей пер-

вого и второго легирования (x_1) концентрация должна быть равной $1/2$ концентрации в максимуме второго легирования.

Для распределения Гаусса координата точки пересечения профилей (x_1) определяются по формуле

$$x_1 = R_{p1} - \Delta R_{p1} \sqrt{2 \ln N_m / N(x_1)} = R_{p1} - 1,178 \Delta R_{p1}, \quad (1)$$

где R_{p1} и ΔR_{p1} соответствуют энергии первого легирования.

В свою очередь для R_{p2} и ΔR_{p2} , соответствующих энергии второго легирования, координату пересечения профилей (x_1) можно определить по формуле $x_1 = R_{p2} + 1,178 \Delta R_{p2}$.

Определив x_1 из (1) и пользуясь графиком $F(E) = R_p(E) + 1,178 \Delta R_p(E)$, можно определить энергию второго легирования. Доза второго легирования устанавливается так же, как и первого. Для третьей и последующих ступеней легирования расчеты аналогичны описанным выше.

Численный эксперимент

В качестве примера согласно разработанным алгоритмам моделирования был проведен численный эксперимент по определению режимов формирования P^{++} -, P -, P^+ -слоев активной структуры двухпролетных ЛПД 4-мм диапазона.

Исходные данные для проведения численного эксперимента включали конструктивные параметры P^{++} -, P -, P^+ -слоев рассматриваемого ЛПД (представленные в табл. 1); тип бомбардирующих ионов, тип и исходный уровень легирования n -эпитаксиального слоя; толщину пленки хрома; коэффициенты dR_p/dE и $d\Delta R_p/dE$ и некоторые другие физические константы, необходимые для расчетов.

Результаты численного эксперимента по моделированию процесса формирования пролетной области представлены в табл. 2 и на рис. 1, 2.

Таблица 1

Конструктивные параметры P^+ , P -, P^{++} -слоев в двухпролетных ЛПД 4-мм диапазона

Тип слоя	P^+	P	P^{++}
N , см ⁻³	$2,1 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$\geq 5 \cdot 10^{19}$
h , мкм	0,1	0,3	0,1

Таблица 2

Режимы многократного ионного легирования P^+ - P -пролетной области двухпролетного ЛПД 4-мм диапазона со ступенчатым профилем легирования

Режимы	1	2	3	4
E , кэВ	162	84	38	14
D , см ⁻²	$7,3 \cdot 10^{12}$	$4,5 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$

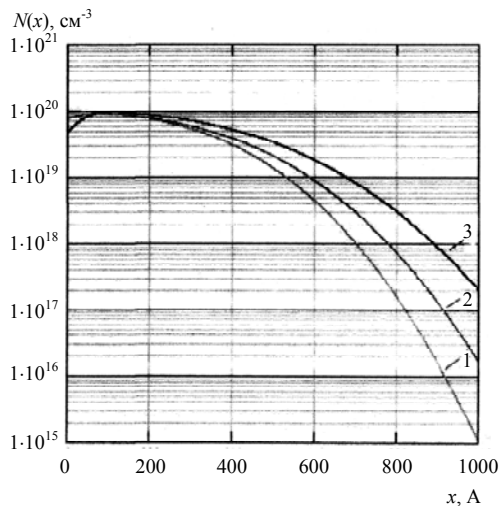


Рис. 1. Профили распределения бомбардирующих ионов бора после бомбардировки структуры Cr—Si ионами бора различной энергии:
1 — 55 кэВ; 2 — 60 кэВ; 3 — 65 кэВ

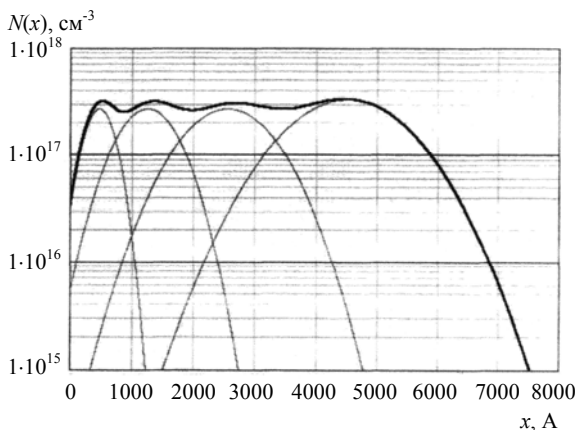


Рис. 2. Результаты численного эксперимента по моделированию процесса формирования P⁺—P-активной области 4-мм ЛПД со ступенчатым профилем легирования:

— профили распределения ионов бора для каждого этапа легирования; — суммарный профиль распределения ионов бора

На рис. 1 представлены: 1 — профили распределения бомбардирующих ионов бора для каждого этапа многократного легирования; 2 — суммарный профиль бомбардирующих ионов бора. Как видно из этих данных, многократное легирование согласно режимам, указанным в табл. 2, обеспечи-

вает формирование P⁺-, P-пролетных областей с заданными конструктивными параметрами.

На рис. 2 приведены профили распределения бомбардирующих ионов бора в кремниевой подложке для различных энергий бомбардировки ионами бора структуры пленка хрома—кремниевая подложка, иллюстрирующие моделирование процесса формирования P⁺-слоя. Из этих данных следует, что бомбардировка структуры Cr—Si ионами бора с энергией $E = 65$ кэВ и дозами $D = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻² обеспечивает формирование необходимого P⁺-слоя.

Выводы

1. Разработаны алгоритмы и инженерная программа моделирования процессов формирования P⁺-, P-, P⁺-слоев двухпролетного ЛПД со ступенчатым профилем легирования.

2. Осуществлен численный эксперимент и определены режимы проведения процесса имплантации через пленки для формирования P⁺-приконтактного слоя двухпролетного ЛПД 4-мм диапазона.

3. Проведен численный эксперимент и определены режимы многократного легирования для формирования P⁺—P-пролетной области двухпролетного ЛПД 4-мм диапазона.

4. Результаты работы могут быть рекомендованы к применению на предприятиях отрасли при разработке технологий новых типов ЛПД.

Литература

1. Tsai M. Y., Streetman B. G. Reekrystallization of Implanted Amorphous Silicon Layers, I. Electrical Properties of Silicon Implanted with BF₂ or Si⁺+B⁺// J. Appl. Phys. 1979. № 50. P. 183
2. Мейер Дж., Эриксон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. — М.: Мир, 1973.
3. Ishiwara H., Furukawa S. Ion implantation in Semiconductor: Plenum Press. — New York, 1975. P. 423.
4. Schiott H. E.// Can. Journ. Phys. 1968. № 46. P. 449.
5. Шауцуков А. Г., Бетуганов М. А. Расчеты профилей распределения ионов в подложке при бомбардировке многослойных структур// Физика и химия обработки материалов. — М., 1978. № 4.
6. Domeij B., Brown F., Davies I. A.// Can. Journ Phys. 1964. V. 42.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2006 г.

The working out of algorithms of modeling process of forming P^{++} -, P -, P^+ -layers of two-bays LPD with stepped profile of alloying

A. G. Shautsukov

The Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

G. D. Kuznetsov

The Moscow State Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia

In the given research work based on the method of implantation through the film and the method of multiple ionic alloying have been worked out algorithms of modeling of process of forming P^{++} of the contact layer and P^+ - P two-flying layer. LPD with stepped profile of alloying numerical experiment is carried out for determining of the regime of forming P^{++} -, P -, P^+ -layers of the twos paned LPD of fourmillimetered diapason (range) with the stepped profile alloying.

УДК 621.383

Преобразователь оптического изображения на основе гетероперехода $Cd_{1-x}Zn_xS—CdTe_{1-x}Se_x$

М. А. Джафаров, Э. Ф. Насиров, А. И. Тахмазова

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

И. А. Насибов

Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

Рассмотрены особенности фотоэлектрических свойств гетеропереходов (ГП) $Cd_{1-x}Zn_xS—CdTe_{1-x}Se_x$ в зависимости от технологических режимов их осаждения из раствора и термической обработки. При освещенности $1,45 \cdot 10^5$ лк фотоэлементы генерировали ЭДС $0,5—0,6$ В, ток $5—8$ мА/см² и имели КПД $\eta = 4—5$ %. Спектральное распределение тока короткого замыкания позволяет охарактеризовать формирователь сигналов изображения на основе ГП $Cd_{1-x}Zn_xS—CdTe_{1-x}Se_x$ как зеленочувствительный по общепринятой классификации для фотографических слоев. Однако структура может работать и во всей области видимого спектра, хотя и с разной чувствительностью. Это позволяет получить три цветоотделенных изображения в основных цветах и тем самым сформировать цветной видеосигнал. Преобразование оптического излучения в электрические сигналы на основе ГП $Cd_{1-x}Zn_xS—CdTe_{1-x}Se_x$ может быть использовано для регистрации слабых оптических изображений с последующей записью их элементов в память с возможной коррекцией фото-чувствительности, а считывание изображения производится ИК-светом.

В неидеальных ГП наблюдается большой набор различных эффектов и явлений, связанных с появлением большого количества электрически активных дефектов на гетерогранице, принимающих участие в токопереносе, поглощении и излучении световых квантов. Перспективность практического применения неидеальных ГП связана в первую очередь с более экономичной технологией создания поликристаллических гетероструктур в сравнении с монокристаллическими. Одним из направлений в изучении неидеальных ГП является возможность применения критериев, разработанных в классической фотографической сенситомет-

рии, к преобразователям оптического изображения в электрический сигнал на основе ГП $Cd_{1-x}Zn_xS—CdTe_{1-x}Se_x$.

Экономичность и технологичность поликристаллических материалов стимулирует их перспективность для изготовления неидеальных гетеропереходов. Одним их подходящих для этих целей методов оказалось химическое осаждение из водного раствора. Указанный метод позволяет получить гетеропереходы с достаточно большой площадью.

Ранее [1—3] сообщалось о получении и исследовании некоторых особенностей гетеропереходов