

Исследование влияния варизонности эпитаксиальных слоев на эффективность работы фотодиодов на основе твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

© В.В. Васильев, Д.Г. Есаев, А.Ф. Кравченко, В.М. Осадчий, А.О. Сусяков

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 10 января 2000 г. Принята к печати 24 января 2000 г.)

Проведены расчеты в рамках одномерной диффузионно-дрейфовой модели характеристик фотодиодов на основе твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с варизонными слоями. Показано, что параметры диодов можно улучшить, если $p-n$ -переход помещать не в центральную гомогенную часть структуры, а в проповерхностную варизонную область. Установлено, что диоды с n -слоем, прилежащим к подложке, имеют преимущество перед диодами с p -слоем у подложки при освещении со стороны подложки.

Уменьшения роли поверхностной рекомбинации в работе фотодиодов и фоторезисторов на основе твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ можно достичь выращиванием у внешних границ варизонных слоев, в которых ширина запрещенной зоны возрастает к внешним границам [1,2]. Имеются теоретические [3] и экспериментальные [4] данные, указывающие на то, что фоточувствительность диодов изменяется, если $p-n$ -переход попадает в варизонную область. Очевидно, что сопротивление диода при этом также изменится. В данной работе мы проводим систематическое исследование численными методами влияния на характеристики фотодиодов положения $p-n$ -перехода относительно варизонных слоев.

Основной характеристикой фотодиода является величина обнаружительной способности $D^* = R_\lambda \times \sqrt{A\Delta f} / \sqrt{I_n^2}$, где A — площадь фотодиода, Δf — полоса частот, I_n — шумовой ток, $R_\lambda = \eta q \lambda / hc$ — ватт-амперная чувствительность на длине волны λ , η — квантовая эффективность, q — заряд электрона, h — постоянная Планка, c — скорость света. Работа прибора характеризуется также произведением дифференциального сопротивления при нулевом смещении на площадь диода $R_0A = A \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=0}^{-1}$. Далее, R_0A будем называть для краткости просто сопротивлением диода. Его величина важна для сопряжения со считывающим устройством, и чем она больше, тем лучше.

В работе проведены расчеты характеристик фотодиодов при температуре $T = 77\text{ K}$ в одномерной диффузионно-дрейфовой модели, включающей уравнение Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок, учитывающие рекомбинацию и фотогенерацию носителей заряда и встроенное поле, образующееся из-за зависимости параметров зонной структуры от координаты [5]. Учтены механизмы рекомбинации: Оже, Шокли-Рида и излучательная, как в работе [6]. Параметры материала взяты из работы [6], поглощение света учтено согласно работе [7]. Исходная система дифференциальных уравнений аппроксимируется конечно-разностной и решается численно. Выходными параметрами этой системы являются распределения потенциала электрического поля и концентраций носителей заряда,

а из них определяются величины токов. Величины R_λ и R_0A вычисляются по вышеприведенным выражениям, квантовая эффективность $\eta = I_p / q\Phi$, где Φ — плотность потока фотонов, I_p — фототок при нулевом смещении на диоде. Обнаружительная способность D^* рассчитывается с учетом только тепловых шумов $I_n^2 = \frac{4k_0T}{R_0} \Delta f$, где k_0 — постоянная Больцмана.

Рассматриваются фотодиоды с профилями содержания кадмия по толщине структуры, близкими к реальным [1]. На рис. 1 приведены эти профили для содержания кадмия в гомогенной части x_{Cd}^b , равного 0.22 и 0.3. Положение $p-n$ -перехода изменяется от середины диода ($z = 5\text{ мкм}$) до поверхности (на рис. 1 справа). Уровни легирования соответствуют реальной ситуации [1]: слой, прилежащий к буферу (на рис. 1 слева), имеет p -тип проводимости

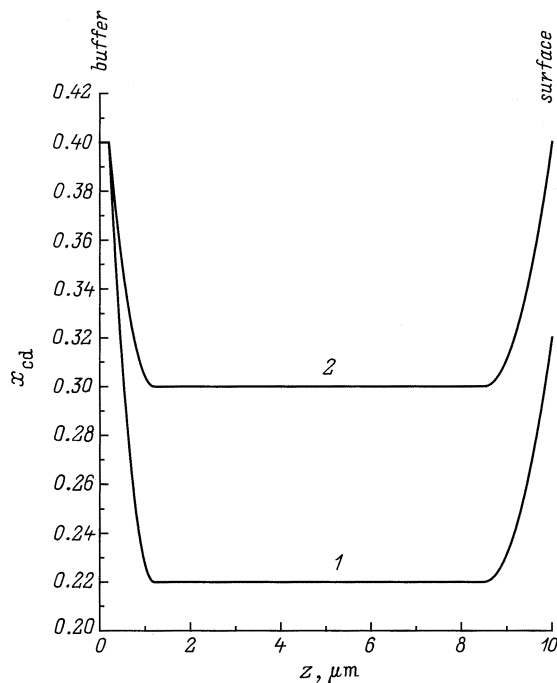


Рис. 1. Профили содержания кадмия в моделируемых структурах для $x_{\text{Cd}}^b = 0.22$ (1) и $x_{\text{Cd}}^b = 0.3$ (2).

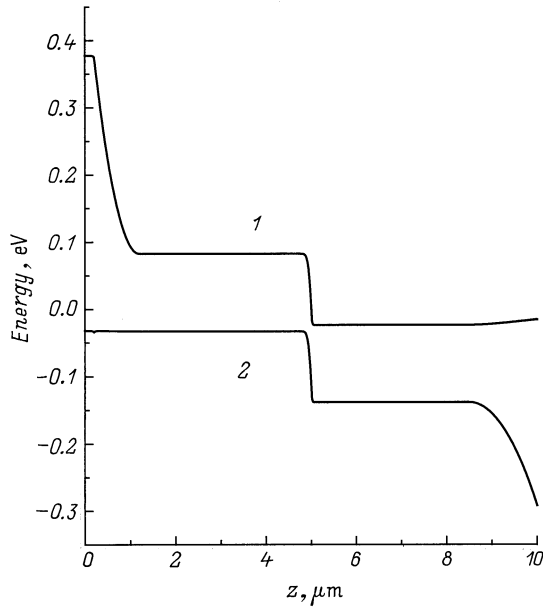


Рис. 2. Профили краев зоны проводимости (1) и валентной (2) в диоде "n на p" при расположении p-n-перехода посередине структуры. $x_{Cd}^b = 0.22$, нулевое смещение. Энергия отсчитывается от уровня Ферми.

и легирование 10^{16} см^{-3} , у поверхности слой n-типа с легированием 10^{17} см^{-3} — назовем эту структуру типа "n на p". p-n-переход считается резким, что является хорошим приближением для полученного ионной имплантацией. Зонная диаграмма фотодиодной структуры с p-n-переходом, расположенным посередине гомогенной области с $x_{Cd}^b = 0.22$, при нулевом приложенном напряжении представлена на рис. 2. Структура освещается со стороны подложки.

Результаты расчета зависимостей R_λ и R_0A от положения p-n-перехода при различном содержании кадмия представлены на рис. 3 и 4 сплошными линиями. Величины R_λ приведены для длин волн, соответствующих максимуму R_λ при расположении p-n-перехода посередине диода, — положение этого максимума слабо изменяется при смещении p-n-перехода. Видно, что независимо от содержания кадмия резкое падение ампер-ваттной чувствительности R_λ начинается при одной и той же глубине расположения p-n-перехода, примерно на расстоянии одного микрона от поверхности. Независимо от положения p-n-перехода ампер-ваттная чувствительность падает, а дифференциальное сопротивление R_0A возрастает с ростом x_{Cd}^b в гомогенной части. Слабое изменение ампер-ваттной чувствительности R_λ при смещении p-n-перехода в гомогенной части структуры, по-видимому, связано с тем, что длины диффузии электронов ($\approx 35 \text{ мкм}$) и дырок ($\approx 12 \text{ мкм}$) соизмеримы с толщиной фотодиода, и распределение по толщине структуры неравновесных носителей заряда, генерируемых светом, обусловлено не диффузией, а функцией фотогенерации.

Увеличение R_0A с ростом x_{Cd}^b при формировании p-n-перехода в гомогенной части фотодиода связано, очевидно, с увеличением сопротивления квазинейтральной области. Что касается существенно более слабого уменьшения ампер-ваттной чувствительности с ростом x_{Cd}^b при расположении p-n-перехода в гомогенной обла-

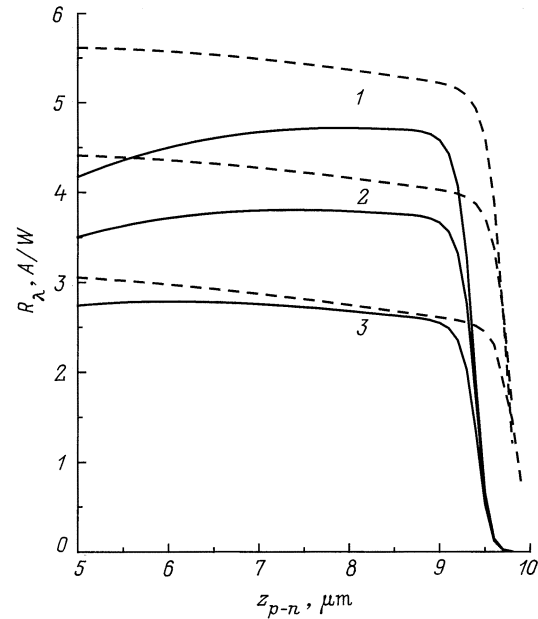


Рис. 3. Зависимость ампер-ваттной чувствительности диода R_λ от положения p-n-перехода: 1 — $x_{Cd}^b = 0.22$, $\lambda = 8 \text{ мкм}$; 2 — $x_{Cd}^b = 0.25$, $\lambda = 6 \text{ мкм}$; 3 — $x_{Cd}^b = 0.3$, $\lambda = 4 \text{ мкм}$. Сплошные линии — диод "n на p", штриховые — "p на n".

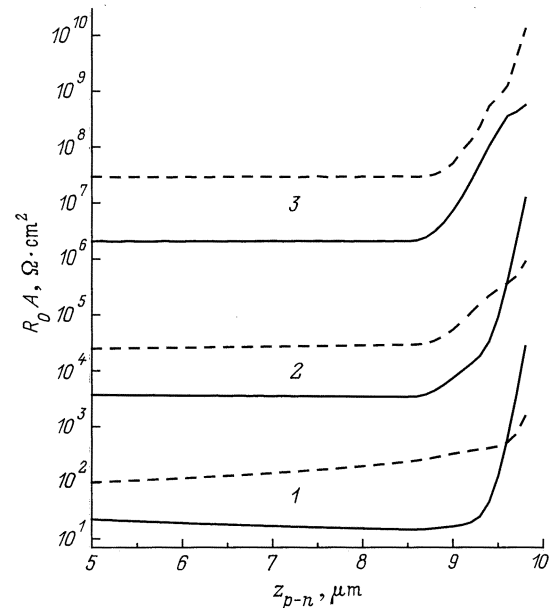


Рис. 4. Зависимость дифференциального сопротивления диода R_0A от положения p-n-перехода: 1 — $x_{Cd}^b = 0.22$, 2 — $x_{Cd}^b = 0.25$, 3 — $x_{Cd}^b = 0.3$. Сплошные линии — диод "n на p", пунктир — "p на n".

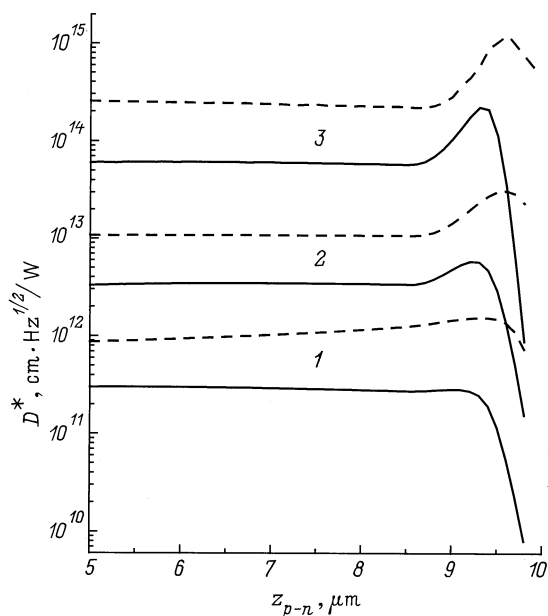


Рис. 5. Зависимость обнаружительной способности диода D^* от положения $p-n$ -перехода: 1 — $x_{Cd}^b = 0.22$, 2 — $x_{Cd}^b = 0.25$, 3 — $x_{Cd}^b = 0.3$. Сплошные линии — диод " n на p'' ", пунктир — " p на n'' ".

сти, то оно обусловлено уменьшением только длины волны, при которой вычисляется R_λ , так как независимо от x_{Cd}^b вблизи максимума чувствительности квантовая эффективность η близка к 1 в довольно широкой области длин волн.

При смещении $p-n$ -перехода к поверхности структуры в области варизонности R_0A резко увеличивается, при этом рост дифференциального сопротивления происходит несколько раньше, чем падение ампер-ваттной чувствительности. Резкое возрастание R_0A при смещении $p-n$ -перехода к поверхности вполне естественно из-за увеличения ширины запрещенной зоны; падение же ампер-ваттной чувствительности в области варизонности вблизи поверхности вызвано ростом барьера для носителей, величина которого определяется как профилем состава, так и профилем легирования [3,4].

В результате этих изменений R_0A и R_λ на зависимости обнаружительной способности D^* от координаты $p-n$ -перехода наблюдается максимум при расположении $p-n$ -перехода на глубине 0.7–0.8 мкм от поверхности (рис. 5). На фоне общего роста обнаружительной способности D^* с увеличением x_{Cd}^b величина максимума в области варизонности возрастает сильнее, превышая D^* при расположении $p-n$ -перехода в гомогенной части структуры при $x_{Cd}^b = 0.3$ примерно в 3.5 раза. Интересно отметить, что наблюдается значительное увеличение R_0A с перемещением $p-n$ -перехода в варизонную область при относительно слабом уменьшении D^* . Так, для $x_{Cd}^b = 0.22$ при глубине $p-n$ -перехода 0.4 мкм от поверхности R_0A возрастает в 30 раз по сравнению с $p-n$ -переходом, расположенным посередине структуры,

а D^* уменьшается при этом в 5.5 раз. Этот эффект выражен еще лучше при увеличении содержания кадмия. Так, в структуре с $x_{Cd}^b = 0.25$ при глубине $p-n$ -перехода 0.4 мкм R_0A растет в 110 раз по сравнению с $p-n$ -переходом, расположенным посередине структуры, а D^* падает при этом всего в 2.5 раза.

Были рассчитаны аналогичные характеристики фотодиода, практически пока не реализованного, у которого вблизи подложки расположен слой n -типа проводимости с уровнем легирования 10^{15} см^{-3} , а на поверхности структуры — p -слой с уровнем легирования 10^{16} см^{-3} (рис. 3–5, штриховые линии). В этих фотодиодных структурах (" p на n'' ") наблюдаются аналогичные зависимости, что и в структурах " n на p'' ", хотя имеются и некоторые особенности. В структурах " p на n'' " в отличие от структур " n на p'' " величина R_0A при смещении $p-n$ -перехода к поверхности в области варизонности изменяется существенно меньше, а, кроме того, при $x_{Cd}^b = 0.22$ медленный рост R_0A начинается уже в области гомогенного слоя фотодиода. Ампер-ваттная чувствительность в структурах " p на n'' " для всех значений x_{Cd}^b при смещении $p-n$ -перехода к поверхности монотонно уменьшается, резко падая, как и в структурах " n на p'' ", в области варизонности. Наконец, обнаружительная способность диода " p на n'' " при $x_{Cd}^b = 0.22$ монотонно растет при смещении $p-n$ -перехода к поверхности и в области варизонности достигает четко выраженного максимума. Падение величины D^* после прохождения максимума на структурах " p на n'' " значительно слабее, чем в структурах " n на p'' ". Хотелось бы подчеркнуть, что величина D^* структур " p на n'' " заметно превосходит D^* в структурах " n на p'' ".

Таким образом, проведенные численные расчеты показывают, что в фотодиодах на основе твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с варизонными слоями возможно улучшение характеристик, если $p-n$ -переход помещать в варизонную область. Фотодиод с p -слоем на n -слое имеет преимущество перед диодом n на p -слое.

Список литературы

- [1] V.N. Ovsyuk, A.O. Suslyakov, T.I. Zakharyash, S.A. Studenikin, V.V. Vasilyev, Yu.G. Sidorov, S.A. Dvoretzky, V.S. Varavin, N.N. Mikhailov, V.I. Liberman. Proc. SPIE, **2746**, 277 (1996).
- [2] В.М. Осадчий, А.О. Сусликов, В.В. Васильев, В.А. Дворецкий. ФТП, **33**, 293 (1999).
- [3] K. Kosai, W.A. Radford. J. Vacuum Sci. Technol. A, **8**, 1254 (1990).
- [4] P.R. Bratt. J. Vacuum Sci. Technol. A, **1**, 1687 (1983).
- [5] K.M. van Vliet, A.H. Marshak. Sol. St. Electron., **23**, 49 (1980).
- [6] A. Rogalski, J. Piotrowski. Prog. Quant. Electron., **12**, 87 (1988).
- [7] W.W. Anderson. Infr. Phys., **20**, 363 (1980).

Редактор В.В. Чалдышев

Research of the influence of graded-band-gap epilayers on the performance of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ photodiodes

V.V. Vasilyev, D.G. Esaev, A.F. Kravchenko,
V.M. Osadchii, A.O. Suslyakov

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The accounts of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ photodiodes with graded-band-gap layers within the framework of one-dimensional diffusion-drift model has been carried out. It is shown that parameters of photodiodes have been improved, if the $p-n$ -junction is placed not in a central homogeneous part of structure, but in a graded-band-gap sub surface area. The photodiodes with a n -epilayer placed not far from substrate have an advantage over diodes with a p -layer at a substrate, illumination being directed from substrate side.