

УДК 621.383.52

С. А. Малышев, С. Ю. Рахлей  
 (Минск, Беларусь)

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ В МАТРИЦАХ  
 ФОТОПРИЕМНИКОВ НА КРЕМНИИ И СОЕДИНЕНИЯХ А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>

Проведено сравнительное исследование фотоэлектрической связи между элементами матриц фотоприемников на кремнии и соединениях А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> — арсениде галлия и фосфиде индия.

Введение оптической связи между элементами многослойных трехмерных структур позволяет расширить функциональные возможности вычислительных систем [1, 2]. Одним из важнейших параметров таких структур является плотность упаковки элементов. Появляющиеся при этом ограничения, определяемые фотоэлектрической связью (ФЭС), перекрестной помехой между расположенными рядом фотоприемниками, могут снизить возможности их интеграции, а также ограничить эффективность оптического канала связи. Детальный математический анализ специфики фотоэлектрической связи [3, 4] и экспериментальные исследования [5, 6] позволили предложить модель диффузионного механизма ее проявления и провести исследования фотоэлектрической связи в матрице кремниевых фотоприемников [7].

В настоящее время практически не рассмотрены с этой точки зрения полупроводниковые материалы А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>, которые все более широко используются в микроэлектронике, в том числе для создания оптоэлектронных интегральных схем. Целью данной работы является исследование фотоэлектрической связи между элементами матриц фотоприемников, сформированных на кремнии и на наиболее распространенных из соединений А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> — арсениде галлия и фосфиде индия.

Для определения коэффициента фотоэлектрической связи  $K_c$  измерялся ток  $I_\phi$  при освещении исследуемого фотоприемника матрицы (рис. 1, а). Затем данный фотоприемник закрывался светонепроницаемым экраном и измерялась величина его тока  $I_c$  при освещении смежного с ним фотоприемника. Значение  $K_c$  определялось по формуле:  $K_c = I_c / I_\phi$ . Спектральные измерения проводились на дифракционном монохроматоре МДР-23 с источником типа "А". Использовался фотогальванический режим работы фотоприемников. Измерительные приборы позволяли регистрировать токи до  $10^{-13}$  А.

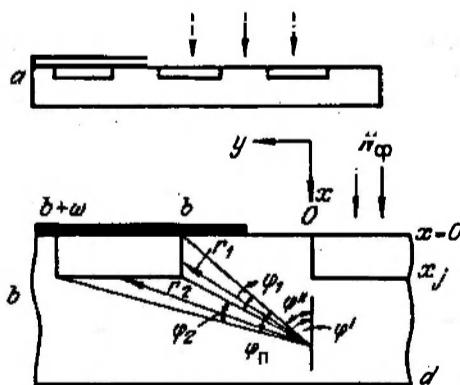


Рис. 1. Фрагмент структуры матрицы фотоприемников, иллюстрирующий положение экрана (а) и модель возникновения диффузионной фотоэлектрической связи (б) [7]

Теоретический анализ ФЭС проводился на IBM PC AT по модели диффузионного механизма взаимного влияния фотоприемников, предложенной ранее [7]. Количество генерируемых светом носителей заряда определялось с учетом многократных отражений в объеме кристалла:

$$N = \frac{N_{\phi}}{1-A} \int_0^d [\exp(-\alpha x) - R_n \exp(\alpha x - 2\alpha d)] dx,$$

где  $A = R_p R_n \exp(-2\alpha d)$ ;  $N_{\phi}$  — количество фотонов, падающих на планарную поверхность фотоприемника;  $R_p, R_n$  — коэффициенты зеркального отражения планарной и обратной поверхностей подложки;  $\alpha$  — коэффициент оптического поглощения.

Область генерации возбужденных светом носителей заряда в общем случае расположена по отношению к  $p-n$ -переходу под углом  $\varphi_n$  (рис. 1, б), который определяет эффективную площадь  $p-n$ -перехода. Неосновные носители заряда, диффундируя в подложке, могут преодолеть расстояние  $r$  от области генерации до области пространственного заряда неосвещенного элемента и дать вклад в фототок с вероятностью

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_n}^{\varphi_n'} \exp\left(-\frac{r}{L}\right) d\varphi.$$

Для получения информации о реально используемых подложках и оценки их различия величина диффузионной длины неосновных носителей заряда была принята для соединений  $A^{III}B^V$   $L = 1$  мкм, для кремния — 40 мкм. Расчеты зависимости коэффициента фотоэлектрической связи от длины волны излучения  $\lambda$ , ширины приемной площадки фотоэлемента  $w$ , межэлементного расстояния  $b$  и толщины подложки  $d$  проводились в спектральной области собственного поглощения. При этом предполагалось, что планарная поверхность фотоприемника освещена равномерно, его элементы имеют бесконечную длину, рекомбинацией в области пространственного заряда и напряженностью поля вне его можно пренебречь.

На величину  $K_c$  существенное влияние оказывают как ширина запрещенной зоны материала, так и диффузионная длина неосновных носителей заряда. Область фоточувствительности арсенида галлия и фосфида индия по сравнению с кремнием смещена в коротковолновую область спектра [8, 9]. Спектральная характеристика  $K_c$  на этих материалах имеет аналогичное смещение относительно друг друга (рис. 2). Следует отметить, что быстрое увеличение  $K_c$  в длинноволновой области спектра обусловлено тем, что механизм ее возникновения, связанный с многократным отражением излучения между планарной и тыльной поверхностями кристалла прибора, становится основным. Экспериментально установлено, что при дальнейшем увеличении длины волны излучения в области низкой фоточувствительности на краю собственного поглощения величина  $K_c$  практически не изменяется, сохраняя относительно высокое значение в диапазоне 0,1—0,3.

В матрицах фотоприемников на кремнии и соединениях  $A^{III}B^V$  на зависимость  $K_c$  от ширины элемента, межэлементного расстояния, толщины подложки помимо параметров материала существенное влияние оказывают

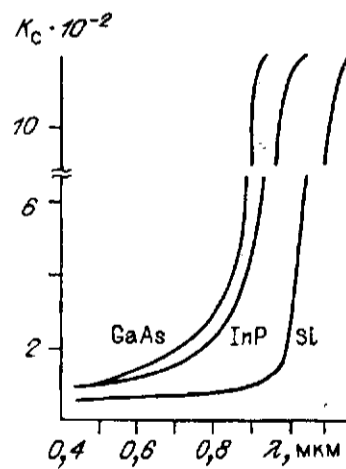


Рис. 2. Спектральная характеристика коэффициента фотоэлектрической связи матрицы фотоприемников

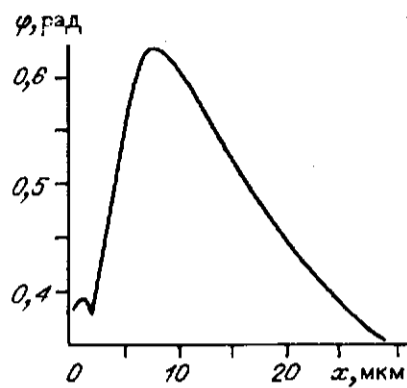


Рис. 3. Зависимость угла, под которым виден  $p-n$ -переход из области фотогенерации, от расстояния этой области до планарной поверхности фотоприемника ( $\lambda = 0,82$  мкм)

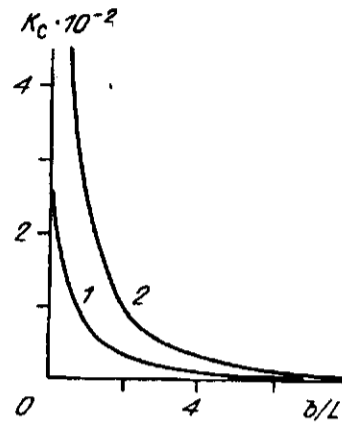


Рис. 4. Зависимость коэффициента фотоэлектрической связи от расстояния между фотоприемниками матрицы ( $\lambda = 0,82$  мкм):  
1 — Si; 2 — GaAs

величины  $r$  и  $\varphi_n$ . Зависимость  $\varphi_n(x)$ , где  $x$  — расстояние от области генерации фотоносителей до планарной поверхности подложки, имеет немонотонный характер (рис. 3). При генерации носителей заряда на глубине, не превышающей глубины залегания  $p-n$ -перехода, собирание генерированных светом носителей заряда происходит на его боковой поверхности. Первый максимум зависимости (см. рис. 3) соответствует половине значения глубины залегания  $p-n$ -перехода, второй — определяется величиной диффузионной длины неосновных носителей заряда материала.

Характер зависимости  $K_c$  от геометрических параметров фотоприемника  $w$  и  $b$  для соединений  $A^{III}B^V$  и кремния близкий к экспоненциальному (рис. 4). При значениях ширины элементов и расстояния между ними больше  $5L$  ФЭС практически не зависит от указанных величин.

Длина волны падающего излучения оказывает существенное влияние на зависимость  $K_c$  от толщины подложки. В спектральных областях, где фотоприемники на кремнии и соединениях  $A^{III}B^V$  обладают низкой фоточувствительностью, зависимость  $K_c = f(d)$  имеет экспоненциальный характер. В области спектра, соответствующей высокой фоточувствительности, зависимость  $K_c$  становится сложнее (рис. 5). Значение экстремума и соответствующая ему величина толщины подложки зависят как от длины волны излучения, так и от диффузионной длины  $L$ .

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что диффузионная длина неосновных носителей заряда является параметром материала, который оказывает существенное влияние на величину  $K_c$ . Соотношение диффузионных длин может служить основой для оценки различия величины фотоэлектрического взаимодействия между фотоприемниками матриц на различных материалах. Показано, что на зависимости  $K_c$  от толщины подложки в спектральной области высокой фоточувствительности имеется максимум, величина которого зависит от

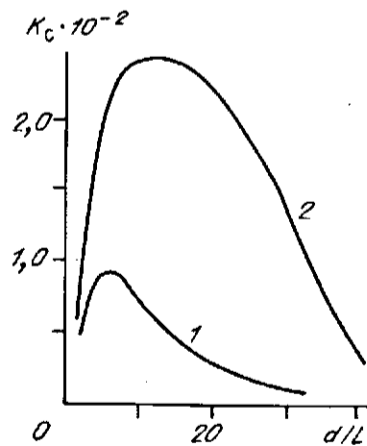


Рис. 5. Зависимость коэффициента фотоэлектрической связи от толщины подложки ( $\lambda = 0,82$  мкм):  
1 — Si; 2 — InP

соотношения глубины поглощения и длины волны излучения. Установлено, что спектральная характеристика коэффициента  $K_c$  фотоматриц на арсениде галлия, фосфиде индия смещена по сравнению с кремнием в коротковолновую область спектра. Соответственно смещена область максимальных значений  $K_c$ , где основным становится механизм, связанный с многократным отражением излучения в объеме подложки. Чем выше доля потока излучения, обуславливающая указанный механизм, тем больше  $K_c$ , что приводит к уменьшению пространственного разрешения прибора при данной плотности упаковки элементов.

Авторы выражают благодарность С. А. Сманцеру за оказание помощи в разработке программы и проведении расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров В. М., Косцов Э. Г. Перспективы создания оптических цифровых высокопроизводительных вычислительных устройств // Автометрия.—1985.—№ 1.
2. Holloway H. Collection efficiency and crosstalk in closely spaced photodiode arrays // J. Appl. Phys.—1986.—60, N 3.—P. 1091.
3. Holloway H., Brailsford A. D. Peripheral photoresponse of  $p-n$  junction // J. Appl. Phys.—1984.—55, N 2.—P. 446.
4. Suni P. P. Photodetectors arrays for optical processing // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.—1989.—1157.—P. 230.
5. Осинский В. И., Врублевский Л. Л., Залесский В. Б., Малышев С. А. Межкомпонентные взаимодействия в интегральных многоэлементных фотоприемниках для волоконно-оптических линий связи // Радиотехника.—1982.—37, № 2.
6. Pellikory S. F., Wurtz H. P. Optical crosstalk in infrared arrays // Proc. SPIE.—1977.—124.—P. 69.
7. Blynskii V. I., Kulikov A. Yu., Rakhley S. Yu., Osinskii V. I. Photoelectric crosstalk between silicon photoelements // Phys. Stat. Sol.—1990.—121A.—P. 227.
8. Уиллардсон Р. К., Бир А. С. Оптические свойства полупроводников.—М.: Мир, 1970.
9. Dash W. C., Newman R. Intrinsic optical absorption in single crystal germanium and silicon at 77K and 300K // Phys. Rev.—1955.—99, N 4.—P. 1151.

Поступило в редакцию 16 марта 1993 г.