

УДК 536.5:621.383.52

Температурная стабильность *m-s*- и *p-n*-фотодетекторов на основе GaAs, GaP, Si

*Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг, О. В. Константинов,
О. И. Оболенский, Е. А. Поссе*

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

*Исследована зависимость квантовой эффективности фотоэлектропреобразовательного процесса от температуры для *m-s*-фотодетекторов на основе GaAs, GaP и *p-n*-фотодетекторов на основе GaAs, Si. Температурная зависимость квантовой эффективности одинакова для всех исследуемых фотодетекторов при энергиях детектируемых фотонов, меньших и близких ширине запрещенной зоны полупроводника. С ростом температуры квантовая эффек-*

тивность растет, что связано с уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводника и увеличением коэффициента поглощения. При энергиях детектируемых фотонов, больших ширины запрещенной зоны полупроводника, квантовая эффективность не зависит от температуры для p - n -фотодетекторов на основе GaAs, Si, причем температурное изменение квантовой эффективности не превосходит 0,01 %/К. Для m - s -фотодетекторов на основе GaAs, GaP квантовая эффективность растет с ростом температуры и имеет тенденцию к насыщению при высоких температурах (300–400 К) и энергиях фотонов 4–6 эВ. Мы полагаем, что это различие связано с тем, что в случае m - s -детекторов фотоэлектронная область находится непосредственно у поверхности полупроводника, и имеющиеся приповерхностные несовершенства влияют на процесс фотоэлектронпреобразования, для p - n -детекторов фотоэлектроактивная область находится в толще полупроводника и влияние поверхности несущественно. Можно утверждать, что фотодетекторы на основе p - n -структур имеют большую температурную стабильность, чем фотодетекторы на основе m - s -структур. Отметим, что m - s -фотодетекторы, в свою очередь, более фоточувствительны в коротковолновой области спектра.

В данной работе проведено детальное исследование температурных зависимостей квантовой эффективности нескольких типов фотоприемников в диапазоне температур 80–360 К и в интервале энергий падающих фотонов 1,1–5,5 эВ:

фотодетекторы на основе кремниевых p - n -структур, являющиеся наиболее распространенными среди ультрафиолетовых полупроводниковых фотоприемников;

фотодетекторы на основе GaAs p - n -структур, широко используемые в качестве детекторов излучения в видимой области спектра;

фотодетекторы на основе поверхностно-барьерных структур на основе GaP и GaAs, активно применяемые в ультрафиолетовой фотометрии.

Несмотря на широкое применение фотоприемников, коротковолновая квантовая эффективность таких структур изучалась ранее, как правило, при комнатной температуре. В работе [1] приводятся данные о температурной стабильности GaP поверхностно-барьерных фотоприемников на основе GaP и GaAs и p - n -фотоприемников на основе GaAs и Si: температурное изменение коротковолновой ($h\nu > 2,8$ эВ) квантовой эффективности в интервале температур $-10 \div +60$ °С не превышает 0,1 %/град.

Фотодетекторы на основе поверхностно-барьерных структур на основе арсенида галлия n - n -GaAs создавались на сильнолегированной подложке n -GaAs с концентрацией электронов $n \approx 10^{17}$ см⁻³ (300 К); на одной стороне подложки был выращен методом жидкофазной эпитаксии слаболегированный слой n -GaAs ($n = 10^{15}$ см⁻³) толщиной ≈ 10 мкм. На этот слой был нанесен химическим осаждением никелевый полупроницаемый для света барьерный контакт, а на обратную сторону подложки — омический контакт. Толщина структуры $d \approx 200$ мкм, площадь освещаемой поверхности $S \approx 0,06$ см².

Поверхностно-барьерные фотодетекторы на основе фосфида галлия n - n -GaP создавались на пластине n -GaP с концентрацией электронов $n \approx 10^{17}$ см⁻³ (300 К), выращенной методом Чохральского. На одной стороне пластины вплавлением индия был создан омический контакт, на другой стороне химическим осаждением золота — полупроницаемый для света барьерный контакт. Толщина структуры $d \approx 200$ мкм, площадь освещаемой поверхности $S \approx 0,2$ см².

Фотодетекторы на основе кремниевых $p-n$ -структур создавались на подложке $n\text{-Si:P}$ с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 20 Ом·см путем диффузии бора на глубину ≈ 30 нм из газовой фазы. Омические контакты были изготовлены на основе алюминия. Площадь освещаемой поверхности $S \approx 0,5$ см².

Исследуемые GaAs $p-n$ -структуры создавались на пластине GaAs, которая была получена методом MOS-гидридной эпитаксии при пониженном давлении в горизонтальном реакторе. Слои GaAs n - и p -типов были изготовлены путем легирования и имели толщины 1,6 и 0,4 мкм и концентрации носителей заряда $n = 10^{15}$ см⁻³ и $p = 10^{19}$ см⁻³ (300 К), соответственно. Площадь освещаемой поверхности $S \approx 12,5$ мм².

Для измерения зависимостей квантовой эффективности фотоэлектропреобразования различных фотоприемников от энергии падающих фотонов в качестве источников света использовались ртутная лампа ДРТ-400 (220—1360 нм), дейтериевая лампа ДВЕ-25 (180—440 нм) и лампа накаливания (300—900 нм) с известными спектральными характеристиками. В качестве спектрального прибора использовался монохроматор ДМР-4. Для обеспечения высокой точности измерений применялась система синхронного детектирования. Фототок измерялся в режиме короткого замыкания. Термостат типа, описанного в работе [2], модифицированный для ультрафиолетового излучения, использовался при температурных измерениях.

Результаты изучения температурных зависимостей квантовой эффективности фотоэлектропреобразования для фотодетекторов на основе GaP поверхностно-барьерной структуры приведены на рис. 1 и сводятся к следующему:

- с ростом температуры от 100 до 360 К квантовая эффективность структур возрастает;
- температурный рост квантовой эффективности тем слабее, чем выше энергия фотонов: увеличение температуры в три раза приводит к увеличению квантовой эффективности в четыре раза при энергии падающих фотонов 2,83 эВ и в 1,5 раза — при энергии падающих фотонов 3,98 эВ;
- зависимость квантовой эффективности от температуры стремится к насыщению при высоких значениях температуры ($E > 300$ К) при энергии фотонов ($h\nu > 3,4$ эВ).

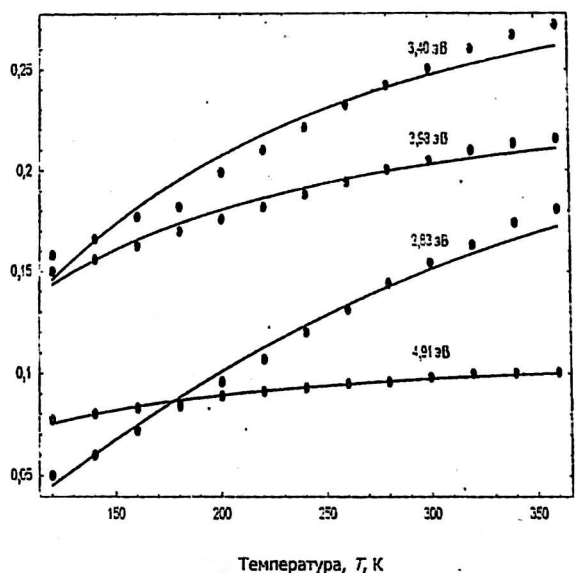


Рис. 1. Зависимость квантовой эффективности фотоэлектропреобразования фотодетектора на основе GaP поверхностно-барьерной структуры от температуры при различных энергиях падающих фотонов

Результаты изучения температурных зависимостей квантовой эффективности фотоэлектропреобразования для поверхностно-барьерных структур на основе GaAs приведены на рис. 2 и сводятся к следующему:

- с ростом температуры от 80 до 300 К квантовая эффективность структур возрастает;
- температурный рост квантовой эффективности тем слабее, чем выше энергия фотонов: увеличение температуры в три раза приводит к увеличению квантовой эффективности в 7,6 раза при энергии падающих фотонов 1,8 эВ и в 3,7 раза — при энергии падающих фотонов 4,68 эВ;
- зависимость квантовой эффективности от температуры стремится к насыщению при высоких значениях температуры и энергии падающих фотонов.

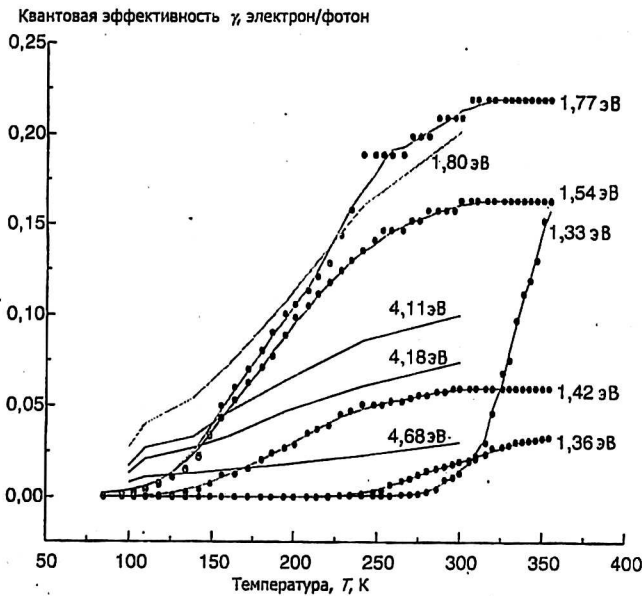


Рис. 2. Зависимость квантовой эффективности фотоэлектропреобразования поверхностно-барьерной структуры на основе GaAs от температуры при различных энергиях падающих фотонов (близких и больших ширины запрещенной зоны)

Сравнение температурных зависимостей квантовой эффективности поверхностно-барьерных структур на основе GaAs и GaP показывает, что зависимость квантовой эффективности γ от температуры T для GaAs-структур существенно более сильная, чем для GaP-структур. Причина такого различия может скрываться как в разном химическом составе полупроводников, так и в различной степени их легирования, поскольку концентрация электронов в исследуемых структурах на основе GaP составляла $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а на основе GaAs $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (300 К).

Результаты температурных зависимостей квантовой эффективности фотоэлектропреобразования для кремниевых $p-n$ -фотодетекторов приведены на рис. 3 и сводятся к следующему:

- при энергиях фотонов 1,1–1,3 эВ квантовая эффективность с ростом температуры возрастает, причем тем сильнее, чем меньше энергия фотонов;
- при энергиях фотонов в интервале 1,4–5,2 эВ квантовая эффективность не зависит от температуры.

Квантовая эффективность η , электрон/фотон

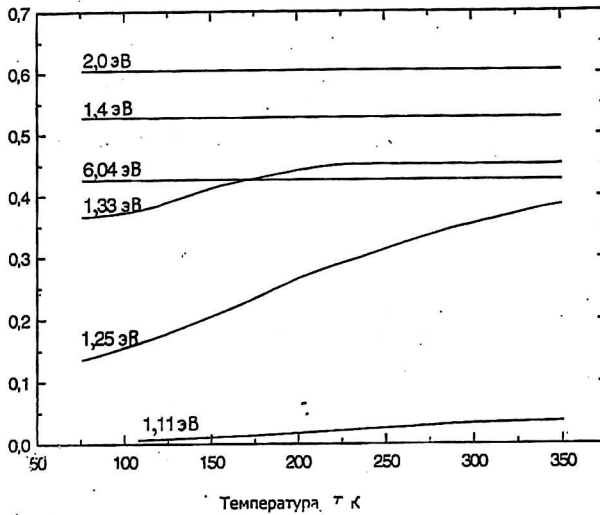


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности фотоэлектропреобразования p - n -структуры на основе кремния от температуры при различных энергиях падающих фотонов

Результаты изучения температурных зависимостей квантовой эффективности фотоэлектропреобразования для p - n -фотодетекторов на основе GaAs приведены на рис. 4 и сводятся к следующему:

- при энергиях фотонов 1,36—1,54 эВ квантовая эффективность с ростом температуры возрастает, причем тем сильнее, чем меньше энергия фотонов;
- при энергиях фотонов в интервале 1,77—5,2 эВ квантовая эффективность не зависит от температуры.

Квантовая эффективность η , электрон/фотон

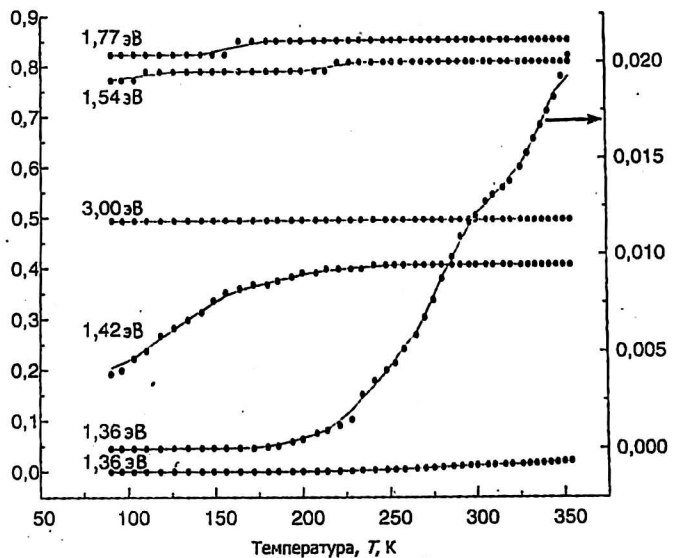


Рис. 4. Зависимость квантовой эффективности фотоэлектропреобразования p - n -структуры на основе GaAs от температуры при различных энергиях падающих фотонов. Для $h\nu = 1,36$ эВ эта зависимость приведена дополнительно в другом масштабе (правая шкала)

Существенное отличие в температурных зависимостях квантовой эффективности для фотодетекторов на основе $p-n$ -структур и на основе поверхностно-барьерных структур заключается в том, что в области собственного поглощения полупроводника квантовая эффективность не зависит от температуры в случае фотодетекторов на основе $p-n$ -структур и возрастает в случае фотодетекторов на основе поверхностно-барьерных структур.

Предполагаем, что это различие связано с тем, что в приповерхностной области полупроводника всегда имеют место несовершенства. В слое объемного заряда, т. е. в присутствии электрического поля, эти несовершенства могут проявлять себя как ловушки носителей заряда, способные захватывать и электроны, и дырки. С ростом температуры носители заряда могут высвобождаться и вносить вклад в фототок.

Поскольку в поверхностно-барьерных структурах слой объемного заряда находится в приповерхностной области, то этот эффект характерен именно для фотодетекторов на основе поверхностно-барьерных структур. В $p-n$ -структурах слой объемного заряда находится в глубине кристалла, и влияние приповерхностных структур практически не зависит от температуры.

В области энергий фотонов, значительно превосходящих ширину запрещенной зоны полупроводника, fotocувствительность детекторов на основе $p-n$ -структур падает, что связано с сильным поглощением света вблизи поверхности. Фоточувствительность же детекторов на основе поверхностно-барьерных структур наблюдается даже при очень высоких энергиях фотонов (больших 5 эВ).

В области энергий фотонов, близких к ширине запрещенной зоны, для обоих типов структур при низких температурах, когда ширина запрещенной зоны больше энергии падающих фотонов, квантовая эффективность существенно возрастает с ростом температуры. При высоких температурах, когда ширина запрещенной зоны становится близкой к энергии падающих фотонов, квантовая эффективность становится практически постоянной.

В области энергий фотонов, меньших ширины запрещенной зоны, температурные зависимости квантовой эффективности для фотоприемников на основе $p-n$ - и фотоприемников на основе поверхностно-барьерных структур подобны. С ростом температуры квантовая эффективность возрастает, что связано с уменьшением ширины запрещенной зоны и ростом коэффициента поглощения света.

Отметим, что fotocувствительность GaAs поверхностно-барьерных структур возникает при меньших энергиях фотонов (1,33 эВ), чем у GaAs $p-n$ -структур (1,36 эВ). Это объясняется наличием "фаулерского" участка fotocувствительности у $m-s$ -структур (эмиссия электронов из металла и переход их в полупроводник).

Таким образом, фотодетекторы на основе $p-n$ -структур имеют более высокую температурную стабильность по сравнению с фотодетекторами на основе поверхностно-барьерных структур, но последние имеют более высокую fotocувствительность в коротковолновой области спектра по сравнению с фотодетекторами на основе $p-n$ -структур.

Л и т е р а т у р а

1. Photodiodes. Hamamatsu Photonics K. K.: Catalog, 1996.
2. Дмитриев А. Г., Царенков Б. В.//ПТЭ. 1972. № 1. С. 208.

Temperature stability of the $m-s$ - and $p-n$ -photodetectors based on GaAs, GaP, Si

T. V. Blank, Yu. A. Goldberg, O. V. Konstantinov,
O. I. Obolensky, E. A. Posse

Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Academy of Science, St.-Petersburg, Russia

The $m-s$ and $p-n$ -photodetectors based on GaAs, GaP, Si are widely employed in medicine, industry, security systems, etc. The detailed study of the temperature dependencies of the quantum efficiency of photoelectric conversion process at different photon energies has been reported for $m-s$ -photodetectors based on GaAs and GaP, and $p-n$ -photodetectors based on GaAs and Si. For photon energies less than and close to the band gap of the corresponding semiconductor the temperature dependencies of the quantum efficiency are similar for the all researched detectors. The quantum efficiency increases with increasing temperature because of the decreasing the width of the band gap and increasing the light absorption coefficient. For detected photon energies above the band gap the temperature dependencies of the quantum efficiency are practically temperature independent for the $p-n$ -detectors based on GaAs and Si. The change in the quantum efficiency for the GaAs and Si detectors is less than 0,01 % per degree. For $m-s$ -photodetectors based on GaAs and GaP the quantum efficiency increases with increasing temperature and tends towards saturation at high temperatures (300–400 K) and high photon energies (4–6 eV). We propose that this difference is connected with imperfections that always take place in the surface region of a semiconductor. For $m-s$ -photodetectors the photoelectrically active region is near to the surface and imperfections influence on photoelectric conversion process. In $p-n$ -photodetectors the photoelectrically active region is deep in the crystal and imperfections don't influence on photoelectric conversion process. Thus, the $p-n$ -photodetectors exhibit higher temperature stability than $m-s$ -photodetectors have; in the same time $m-s$ -photodetectors exhibit a higher photosensitive in the short-wavelength region.