

К. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, Е. В. КОМАРОВ,  
М. П. БИКСЕЙ

Украина, г. Черновцы, ЦКБ "Ритм"  
E-mail: yuriydr@gmail.com

Дата поступления в редакцию  
23.12.2004 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. Д. ФОТИЙ  
(КТБ "Фотон", г. Черновцы)

## ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ФОТОПРИЕМНИК

*Приведены результаты разработки двухспектрального фотоприемника, в котором фотодиоды расположены один над другим. Фотоприемник отличается повышенной чувствительностью верхнего фотодиода.*

Развитие систем, использующих оптические методы локализации и передачи информации, предусматривает использование различного рода фотоприемников. Чаще всего в таких системах используются фоторезисторы, фотодиоды и фотоприемные устройства [1]. В последних предусмотрено предварительное усиление фотосигнала.

Как правило, электронно-оптические системы используют один оптический канал, который обеспечивает регистрацию оптического излучения одной длины волны или интегрального потока излучения в некотором спектральном диапазоне. Такой подход создает ряд трудностей при приеме оптического излучения в условиях оптических помех в области рабочих длин волн. Поэтому целью данной работы является решение такой актуальной задачи в области оптоэлектроники как повышение помехоустойчивости и надежности работы оптоэлектронной аппаратуры в условиях затрудненности прохождения оптического сигнала.

Наиболее часто используемый способ решения поставленной задачи заключается в повышении пороговой чувствительности разрабатываемых фотоприемников, в частности путем уменьшения уровня обратных токов и повышения чувствительности [2—6]. Несмотря на то, что такой подход дает определенные результаты, в некоторых случаях этого недостаточно.

Исследования, изложенные в этой работе, направлены на создание фотоприемника, способного обеспечить устойчивый прием оптического сигнала рабочей длины волны при наличии помех, ослабляющих этот сигнал. Техническое решение этой задачи заключается в использовании двухспектрального фотоприемника, представляющего собой оптоэлектронный прибор, работающий одновременно по двум оптическим каналам — на двух длинах волн оптического излучения или в двух спектральных диапазонах.

Обычно в таком приборе используются два фотоприемника. Нами рассмотрен случай, когда эти фотоприемники располагаются один над другим в стол-

бик [7]. Схематическое изображение такой структуры приведено на рис. 1. При этом первый, верхний фотоприемник является основным, а нижний, который поглощает все оптическое излучение, прошедшее сквозь верхний фотоприемник, является дополнительным и используется в качестве опорного. В такой структуре спектральный диапазон верхнего фотоприемника является определяющим по сравнению с чувствительностью нижнего, опорного фотоприемника. Преимущество такой структуры состоит в том, что информация может приниматься ею по двум оптическим каналам одновременно. При этом рабочие длины волн выбираются с учетом возможных условий эксплуатации прибора.

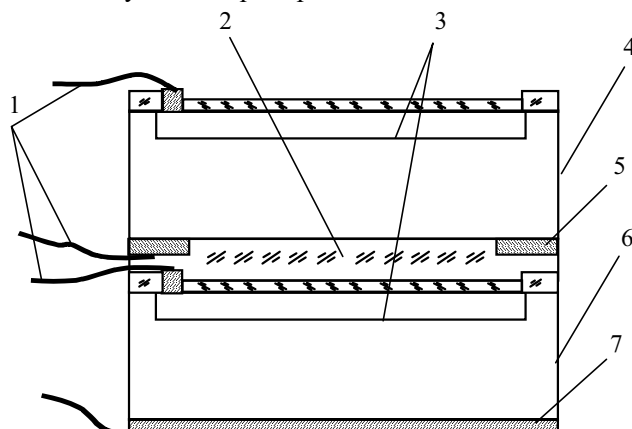


Рис. 1. Схематическое изображение фотоприемника с фотодиодами, расположенными в столбик: 1 — выводы фотодиодов; 2 — оптический клей; 3 —  $p-n$ -переходы; 4 — верхний фотодиод; 5 — тыльный металлический контакт с отверстием к верхнему фотодиоду; 6 — нижний фотодиод; 7 — тыльный металлический контакт к нижнему фотодиоду

В качестве основного фотоприемника выбран кремниевый  $p-i-n$ -фотодиод. Такое решение обусловлено тем, что при подаче на фотодиод обратного смещения определенной значения область объемного заряда в объеме кристалла фотодиода может быть растягнута на всю его толщину. Тем самым обеспечивается эффективный сбор фотогенерированных носителей заряда. Кроме того, такая конструкция способна свести к минимуму инерционные свойства фотодиода [2].

Рабочей длиной волны  $\lambda$  выбрано значение 1,06 мкм, поскольку волна такой длины способна проходить сквозь достаточно толстые слои кремния (с другой

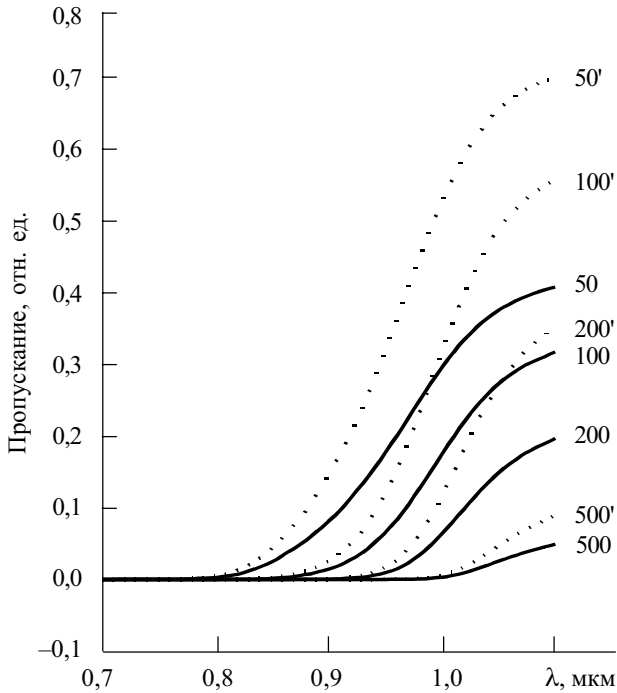


Рис. 2. Пропускание плоскопараллельной кремниевой пластины (50, 100, 200, 500 мкм) и пластины с нанесенной на обе стороны окисной пленкой толщиной 0,18 мкм (50', 100', 200', 500' мкм)

стороны, существуют серийно выпускаемые источники такого излучения). Для оценки количества излучения, способного пройти сквозь верхний фотодиод, а также для оценки коэффициентов отражения его поверхностей, рассчитаны спектры пропускания плоскопараллельных кремниевых пластин различной толщины при поглощении оптического излучения (рис. 2). Из расчетов следует, что только 5% оптического излучения с длиной волны 1,06 мкм проходит сквозь кремниевую пластину (кристалл фотодиода) толщиной 500 мкм с просветляющим слоем окисла кремния на обеих поверхностях. А при толщине кремниевой пластины 200 мкм через нее проходит до 20% излучения. Поэтому при расчете конструкции двухспектрального фотоприемника необходимо выбирать оптимальное соотношение между рабочими длинами волн, толщиной кристалла верхнего фотоприемника и величинами чувствительности верхнего и нижнего фотоприемников.

В двухспектральных фоточувствительных структурах, в которых фоточувствительные элементы (фотодиоды) расположены в столбик, фотодиод, расположенный сверху, является входным окном для опорного фотодиода, регистрирующего излучение с  $\lambda$  более 1,06 мкм. С другой стороны, этот фотодиод предназначен для регистрации более коротковолнового излучения, с  $\lambda$  менее 1,06 мкм. Значительная часть излучения с большей длиной волны (например, если в качестве опорного фотоприемника используется германиевый фотодиод с рабочей длиной волны 1,5 мкм) проходит сквозь кремниевый  $p-i-n$ -фотодиод через окно в контактном слое на его тыльной стороне. При этом значение чувствительности этого фотодиода меньше по сравнению с аналогичным фо-

тодиодом, имеющим сплошную металлизацию тыльной стороны.

Это явление связано с тем, что у кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодов, оптимизированных на прием оптического излучения с  $\lambda=1,06$  мкм, общий контакт с тыльной стороны кристалла выполняется сплошным, т. е. покрывающим всю тыльную поверхность кристалла. При этом сплошной металлический контакт выполняет роль отражающего покрытия, которое отражает значительную часть излучения, не поглощенную объемом кристалла фотодиода и дошедшую до контакта. Глубина практически полного поглощения излучения с  $\lambda=1,06$  мкм составляет около 1000 мкм. Толщина же кристалла фотодиода, с учетом этого фактора, выбирается 400—500 мкм. Использование отражения оптического излучения тыльным контактом позволяет обеспечить двойное прохождение оптического излучения в объеме кристалла фотодиода и увеличить количество сфотогенерированных носителей тока. При этом чувствительность фотодиода на длине волны 1,06 мкм увеличивается. В случае, когда металлический контакт с тыльной стороны кристалла выполнен не сплошным, а имеющим отверстие (как правило, соизмеримого с размерами фоточувствительного элемента верхнего фотодиода), двойное отражение оптического излучения отсутствует и чувствительность верхнего фотоприемника (кремниевого  $p-i-n$ -фотодиода) уменьшается.

Чувствительность фотодиода, в том числе кремниевое  $p-i-n$ -фотодиода, с учетом отражения излучения от тыльного контакта можно оценить с помощью выражения

$$S_{i\lambda} = (1 - R_{1\lambda}) \frac{e_0 \gamma_{\lambda} \lambda}{hc} (1 - e^{-\alpha_{\lambda} x_0}) (1 + R_{2\lambda} e^{-\alpha_{\lambda} x_0}), \quad (1)$$

где  $S_{i\lambda}$  — токовая монохроматическая чувствительность для заданной длины волны;

$R_{1\lambda} = 0,062$  — коэффициент отражения от поверхности "воздух-окисел-кремний" для заданной длины волны (1,06 мкм);

$e_0$  — элементарный электрический заряд (заряд электрона);

$\gamma_{\lambda}$  — коэффициент использования фототока (внутренний квантовый выход) для кремниевых  $p-i-n$ -структур со слабой рекомбинацией носителей, обусловленной практически отсутствием нейтральных областей; составляет примерно 0,95;

$\lambda$  — заданная длина волны;

$h$  — постоянная Планка;

$c$  — скорость света в вакууме;

$\alpha_{\lambda}$  — коэффициент поглощения излучения с заданной длиной волны в кремнии (для  $\lambda = 1,06$  мкм  $\alpha_{\lambda} \approx 1 \text{ мм}^{-1}$ );

$x_0$  — ширина области объемного заряда;

$R_{2\lambda} = 0,57$  — коэффициент отражения от тыльной поверхности, в данном случае от пленки хрома, который применяется в качестве адгезионного слоя для контакта "золото-кремний" (в случае золотого контакта без подслоя хрома коэффициент отражения  $R_{2\lambda} \rightarrow 1$ ).

При отсутствии отражения с тыльной стороны кристалла фотодиода ( $R_{2\lambda} \rightarrow 0$ ) общая величина чувствительности уменьшается. Величину такого уменьшения можно оценить выражением

$$\delta S_{i\lambda}(R_{2\lambda}) = 1 + R_{2\lambda} e^{-\alpha_{\lambda} x_0}. \quad (2)$$

С помощью выражения (2) несложно оценить, во сколько раз уменьшается чувствительность фотодио-

да на длине волны 1,06 мкм. Если принять, что в (1)  $x_0 \approx 400$  мкм, то  $S_{i\lambda}(R_{2\lambda})$  составит 1,57, что соответствует случаю, когда для улучшения адгезии золота с кремнием применяется подслоя хрома. Если же толщина подслоя хрома стремится к нулю, то величина  $R_{2\lambda}$  стремится к единице, и в идеальном случае  $\delta S_{i\lambda}(R_{2\lambda})$  будет равно 2, т. е. чувствительность фотодиода, не имеющего сплошного зеркального металлического контакта с тыльной стороны, в два раза меньше, чем чувствительность фотодиода, который имеет такой контакт.

С точки зрения поглощенной мощности оптического излучения чувствительность определяется как отношение фототока  $I_{\phi}$  к оптической мощности  $P$ , которая генерирует этот ток:

$$S_{i\lambda} = I_{\phi} / P. \quad (3)$$

Величину фототока можно выразить через произведение удельного фототока  $I_{\phi y}$  на площадь, освещаемую оптическим зондом, —  $S$ . С учетом отражения оптического излучения тыльным зеркальным контактом величина чувствительности будет равна

$$S_{i\lambda} \cong S_{i\lambda}^1 + S_{i\lambda}^2 = \frac{I_{\phi y}^1 S_1}{P} + \frac{I_{\phi y}^2 S_2}{P}, \quad (4)$$

где  $S_{i\lambda}^1$  — чувствительность, обусловленная оптическим излучением, падающим на фотодиод;

$S_{i\lambda}^2$  — чувствительность, обусловленная оптическим излучением, отраженным от тыльного зеркального контакта;

$I_{\phi y}^1$  — удельное значение фототока, генерированное с единичной площадки, которая обеспечивает чувствительность  $S_{i\lambda}^1$ ;

$I_{\phi y}^2$  — удельное значение фототока, генерированное с единичной площадки тыльного зеркального контакта, которая обеспечивает чувствительность  $S_{i\lambda}^2$ ;

$S_1$  — площадь фоточувствительного элемента, освещаемая падающим на фотодиод оптическим излучением;

$S_2$  — площадь, отражающая оптическое излучение на зеркальном тыльном контакте.

Как видно из (4), величину чувствительности верхнего кремниевого  $p-i-n$ -фотодиода для двухспектрального фотоприемника можно увеличить на величину второго слагаемого, которое в основном определяется площадью отражающего зеркального контакта с тыльной стороны кристалла фотодиода  $S_2$ . Очевидно, что сплошным этот контакт быть не должен, поскольку длинноволновое оптическое излучение не сможет проникнуть через верхний  $p-i-n$ -фотодиод.

Для увеличения чувствительности кремниевого  $p-i-n$ -фотодиода, расположенного сверху, согласно результатам, изложенным выше, необходимо изменить форму контакта с тыльной стороны кристалла фотодиода. Эта форма определяется следующими условиями:

— диаметром зонда оптического излучения, которое просвечивает кристалл фотодиода (в данном случае — оптическое излучение с  $\lambda=1,06$  мкм);

— чувствительностью фотоприемника, принимающего оптическое излучение, прошедшее через кристалл  $p-i-n$ -фотодиода, точнее — необходимая площадь, которая освещается этим излучением;

— возможностью поглощать и пропускать оптическое излучение, которое падает на кристалл фотодиода в виде оптического зонда достаточно малого диаметра.

Первое и третье условия обеспечиваются ячеистой структурой отражающего контакта, при этом ячейки могут быть представлены как отверстиями в металлизации, так и участками металлизации, в зависимости от требований к чувствительности  $p-i-n$ -фотодиода и фотоприемника, принимающего излучение, прошедшее через  $p-i-n$ -фотодиод. Во втором случае обеспечить электрический контакт между металлизированными изолирующими ячейками можно с помощью оптически прозрачной электропроводной пленки, например слоя ИТО (смесь  $In_2O_3$  и  $SnO_2$ ) или окиси олова  $SnO_2$ , которые являются прозрачными для оптического излучения с длиной волны более 0,3 мкм. Кроме того, эти соединения обеспечивают надежный электрический контакт. При использовании пленки окиси олова или смеси окислов индия и олова коэффициент отражения от тыльной стороны уменьшается до 0,134.

Второе условие определяется из требования обеспечения необходимого уровня чувствительности фотоприемника, принимающего оптическое излучение, прошедшее через кремниевый  $p-i-n$ -фотодиод, при заданном размере оптического зонда.

С учетом изложенного разработано два варианта конструкции  $p-i-n$ -фотодиода для двухспектрального фотоприемного устройства.

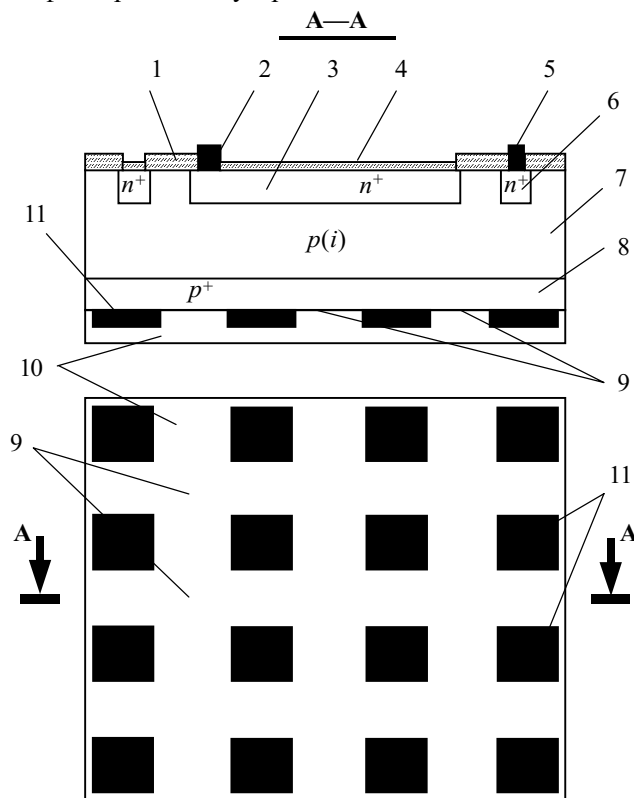


Рис. 3. Схематическое изображение кристалла  $p-i-n$ -фотодиода для двухспектрального фотоприемника и его сечение: 1 — защитный окисел; 2 — металлический контакт к фоточувствительному элементу; 3 — просветляющее покрытие (окисел кремния); 4 — просветляющее покрытие; 5 — металлический контакт к охрannому кольцу; 6, 7 — кремниевая подложка  $p$ -типа проводимости (в объеме кремния при рабочем напряжении — область собственной проводимости  $i$ ); 8 — геттерирующий слой; 9 — окна в металлическом контакте; 10 — оптически прозрачная в выбранном диапазоне длин волн токопроводящая пленка; 11 — металлический (зеркальный) контакт с тыльной стороны

В первом варианте отражающий контакт с тыльной стороны кристалла выполнен в виде ячеистой структуры. Ячейки представляют собой множество свободных от металлизации участков, минимальная площадь каждого из которых определяется из условия обеспечения требуемой чувствительности нижнего фотоприемника при заданном размере оптического зонда.

Во втором варианте конструкции тыльный контакт кристалла фотодиода представляет собой металлизированные ячейки, а общий контакт между ними осуществляется с помощью прозрачной в выбранном диапазоне длин волн токопроводящей пленки — например с помощью слоя ИТО (смесь  $In_2O_3$  и  $SnO_2$ ) или окиси олова  $SnO_2$ . В качестве примера на рис. 3 проиллюстрирован второй вариант конструкции кристалла фотодиода. При такой конструкции потери чувствительности верхнего, основного, кремниевого  $p-i-n$ -фотодиода, оптимизированного на длину волны 1,06 мкм, составляют не более 25%.

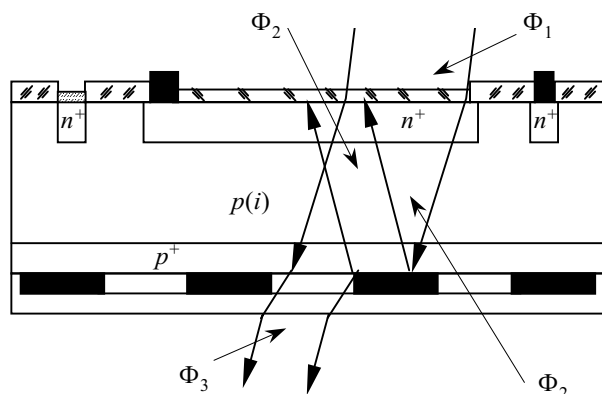


Рис. 4. Ход лучей падающего потока оптического излучения  $\Phi_1$  в объеме кристалла  $p-i-n$ -фотодиода для двухспектрального фотоприемника и за его пределами

Работа фотодиода проиллюстрирована рис. 4 и состоит в следующем. Поток оптического излучения  $\Phi_1$  определенной длины волны и определенного сечения попадает через фоточувствительный элемент в область объемного заряда фотодиода, где генерирует фотоносители, которые, разделяясь на  $p-n$ -переходе, порождают во внешней цепи некоторый фототок  $I_{\Phi_1}$ . Попадая на тыльный отражающий контакт, поток  $\Phi_1$  разделяется на два потока; один из них — отраженный поток  $\Phi_2$  — генерирует в области объемного заряда фотоносители, которые, разделяясь на  $p-n$ -переходе, дают во внешней цепи некоторый фототок  $I_{\Phi_2}$ . Поток, прошедший через окно в тыльном контакте ( $\Phi_3$ ), обеспечивает необходимую чувствительность нижнего приемника. Таким образом, общая величина фототока и, соответственно, чувствительности верхнего фотодиода будет равна сумме  $I_{\Phi_1}$  и  $I_{\Phi_2}$ .

С учетом разработанных технических решений было изготовлено несколько партий фотодиодов, предназначенных для работы в качестве верхнего фотодиода в двухспектральном фотоприемнике. Фотодиоды отличались формой металлического контакта с обратной стороны кристалла.

Следует отметить, что для успешной работы предложенный фотодиод должен быть выполнен из крем-

ния  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением не меньше 10 кОм·см. Величина рабочего напряжения на фотодиоде должна обеспечивать расширение области пространственного заряда на всю толщину кристалла фотодиода. Это требование обусловлено тем, что неосновные носители заряда, генерированные оптическим излучением во всем объеме кристалла, собирались электрическим полем к  $p-n$ -переходу. Кроме того, высокое удельное сопротивление кремния как исходного материала и высокое напряжение (обычно оно составляет 100—200 В), которое прикладывается к  $p-n$ -переходу, позитивно влияют на инерционные свойства фотодиода. Металлический контакт с обратной стороны кристаллов фотодиодов выполнялся методом вакуумного напыления золота толщиной 0,5—0,7 мкм с подслоем хрома толщиной менее 0,1 мкм.

Первая группа фотодиодов имела сплошной контакт с тыльной стороны, вторая — окно в металлизации тыльной стороны, площадь которого равна площади фоточувствительного элемента (рис. 1). Третья группа фотодиодов имела тыльный контакт ячеистой формы (рис. 3).

Для оценки качества обеих конструкций  $p-i-n$ -фотодиода применительно к их использованию в двухспектральном фотоприемнике было проведено измерение токовой монохроматической чувствительности на длине волны  $\lambda=1,06$  мкм. Измерения проводились по стандартным методикам [8]. Результаты измерений приведены в таблице.

Токовая монохроматическая чувствительность ( $S_{ix}$ , A/Bm) кристаллов  $p-i-n$ -фотодиодов с различной формой металлизации контакта с их обратной стороны

Вариант 1 (сплошной контакт)	Вариант 2 (сплошное окно в контакте)	Вариант 3 (ячеистая структура контакта)
0,31	0,12	0,19
0,3	0,13	0,18
0,3	0,13	0,2
0,32	0,11	0,21
0,3	0,13	0,2
0,28	0,12	0,19
0,3	0,1	0,18
0,29	0,12	0,19
0,31	0,12	0,2
0,3	0,13	0,21

Как видно из таблицы, оптимальной является конструкция, в которой контакт с тыльной стороны кристалла выполнен в виде ячеистой структуры, в которой области, занятые металлизацией, чередуются с областями, свободными от нее. Размеры ячеек определяются размерами оптического зонда излучения с длиной волны 1,06 мкм.

\*\*\*

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана конструкция двухспектрального фотоприемника, в котором фотодиоды, оптимизированные на разные длины волн, расположены в столбик. Фотоприемник отличается повышенной чувствительностью верхнего фотодиода.

2. При расчете конструкции двухспектрального фотоприемника необходимо выбирать оптимальное соотношение между рабочими длинами волн, толщиной кристалла верхнего фотоприемника и величинами чувствительности верхнего и нижнего фотоприемников.

3. Исследованы факторы, влияющие на чувствительность верхнего фотодиода. Показано, что оптимальной является конструкция, в которой контакт с тыльной стороны кристалла выполнен в виде ячеистой структуры, в которой области, занятые металлизацией, чередуются с областями, свободными от нее. Размеры ячеек определяются размерами оптического зонда излучения с длиной волны 1,06 мкм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Заитов Ф. А., Курмашев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра.— М.: Радио и связь, 1984.  
 2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2.— М.: Мир, 1984.

3. Годованюк В. Н., Добровольский Ю. Г., Остапов О. Э. и др. Состояние и перспективы микрофотоэлектронного комплекса в Черновицком регионе Украины // Прикладная физика.— 2003.— Вып. 3.— С. 72—83.

4. Ашеулов А. А., Годованюк В. Н., Добровольский Ю. Г. и др. Оптимизация надежности кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодов по темновому току // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1999.— № 1.— С. 35—38.

5. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорокин К. В. О влиянии сопротивления поверхностного канала на темновой ток квадрантных  $p-i-n$ -фотодиодов на кремнии // Прикладная физика.— 1999.— Т. 2.— С. 79—85.

6. Ашеулов А. А., Добровольский Ю. Г., Безулик В. А. Воздействие электрического и магнитного полей на параметры полупроводниковых приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2000.— № 1.— С. 33—35.

7. Добровольский Ю. Г., Комаров Е. В., Биксей М. П. Кремниевый фотодиод для двухспектрального фотоприемного устройства / Тр. Второй междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» ("СИЭТ-2001").— Одесса.— 2001.— С. 321—322.

8. ГОСТ 17772—88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик.— М.: Изд-во стандартов.— 1988.

*Д. т. н. С. И. ЮЦУК, к. ф.-м. н. С. А. ЮРЬЕВ,  
 П. С. КОСТЮК, В. И. БОНДАР*

Украина, НУ "Львовская политехника"  
 E-mail: syuryev@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
 15.03 2005 г.

Оппонент *к. т. н. К. В. МАЛЫШЕВ*  
 (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

## ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРОГРАНАТОВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

*На основе выращенных пленок железитриевого граната разработаны СВЧ полосно-пропускающие фильтры, линии задержки для использования в СВЧ-электронике.*

Проблема микроминиатюризации узлов и устройств радиоэлектронной аппаратуры не может быть решена без качественно новых материалов, к которым принадлежат феррогранатовые эпитаксиальные структуры (ФЭС). Применение ФЭС в сверхвысоко-частотной электронике вместо объемных монокристаллических резонаторов снижает производственные затраты, улучшает параметры приборов, позволяет использовать технологию интегральных схем, приводит к уменьшению габаритов и повышению надежности СВЧ-узлов [1—3].

Принцип работы устройств СВЧ-техники, создаваемых с использованием ФЭС, базируется как на однородном типе прецессии спинов [4], так и на распространении в ферритовой среде магнитостатических волн (МСВ) [5]. Характеристики распространения МСВ зависят от степени однородности внутреннего магнитного поля в кристалле, а величина потерь при этом непосредственно связана с качеством феррогранато-

вых пленок, которое определяется шириной линии ( $\Delta H$ ) ферромагнитного резонанса (ФМР), однородностью химического состава, толщины и магнитных параметров по площади пленки, стабильностью этих параметров в интервале рабочих температур.

Выращиваемые нами феррогранатовые пленки характеризуются широким диапазоном толщины и намагниченности, узкими линиями ФМР и малыми магнитными потерями, низкой дефектностью, однородностью по толщине и магнитным параметрам, повышенной термостабильностью намагниченности и резонансной частоты [6—8].

### Выращивание эпитаксиальных феррогранатовых пленок

Пленки выращивали путем изотермического погружения монокристаллических подложек из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) ориентации (111) в перенасыщенный раствор-расплав ферритовой шихты с использованием растворителя  $PbO-V_2O_5$ . Подложки вырезали из монокристалла ГГГ, выращенного по методу Чохральского, с последующей их шлифовкой и полировкой до 14-го класса чистоты. Толщина подложек составляла 0,5 мм. Для эпитаксиального выращивания использовали автоматизированную установку с компьютерным управлением технологиче-