

ЛИТЕРАТУРА

1. Raab F. H. Remote object position and orientation lacater. — US patent N 4314251, G01S 5/02, 1982.
 2. <<http://polhemus.com/>>
 3. Blood E. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields. — US patent N 4849692, G01B 7/14, 1989.
 4. <<http://www.ascension-tech.com/>>
 5. Годунов В. А., Степанов Д. В., Третьяков Д. А. и др. Современные наשלменные системы целеуказания и индикации // Авиакосмическое приборостроение. — 2003. — № 5.
 6. Годунов В. А., Желамский М. В., Степанов Д. В., Третьяков Д. А. Вопросы теории позиционирования подвижного объекта в магнитном поле // Авиакосмическое приборостроение. — 2003. — № 8.
 7. Желамский М. В. Увеличение чувствительности магнитных измерений в авионике // Авиакосмическое приборостроение. — 2004. — № 12.
 8. Желамский М. В. Полное позиционирование подвижных объектов при помощи одной измерительной системы // Авиакосмическое приборостроение. — 2006. — № 8.
 9. Годунов В., Желамский М., Метелкина Т. и др. К вопросу достижения предельной точности позиционирования линии визирования цели на подвижных платформах // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2007. — № 3.
 10. Желамский М. В. Магнитное позиционирование в наשלменных системах // Электроника — НТБ. — 2006. — № 7.
 11. Желамский М. Электромагнитное позиционирование — преимущества и области применения // Электроника — НТБ. — 2007. — № 3.
 12. Желамский М. Магнитное позиционирование в системах виртуальной и дополненной реальности // Электроника — НТБ. — 2007. — № 5.
 13. Желамский М. Первая отечественная система магнитного позиционирования в полном объеме технических требований. Этап 1 — физический пуск // Датчики и системы. — 2009. — № 1.
 14. Заявка на изобретение № 2008136343 “Способ определения линейного положения и ориентации подвижного объекта” от 09.09.2008 г.
 15. Желамский М. Глобальная система виртуальной и дополненной реальности для закрытых пространств // Датчики и системы. — 2009. — № 7.
 16. Желамский М. В., Морозов Ю. Т., Калинин А. Г. и др. Новый метод позиционирования бурового инструмента, основанный на отечественной магнитной технологии // Инженер - нефтяник. — 2009. — № 3.
 17. Желамский М. Откуда что возьмется? // Управление проектами. — 2009 № 17 (декабрь).
 18. <http://www.ismar10.org/index.php/Main_Page>
- Михаил Васильевич Желамский — канд. техн. наук, научн. руководитель инициативного проекта “МАИТЕХ” (Магнитные инструментальные технологии).
- ☎ 8-921-786-35-66
- E-mail: zhelamsk@rambler.ru, MAITECH@rambler.ru □

УДК 53.082.9

К содержанию

ГРАДИЕНТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМИ МИКРО- И НАНОГРАНУЛАМИ В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ

В. В. Амеличев, Т. Н. Герасименко, П. А. Поляков, С. И. Касаткин

Представлены результаты теоретического анализа управления движением магнитных микро- и наногранул в градиентном магнитном поле в вязкой среде. Данная задача имеет важное практическое значение для разработки магниторезистивного биосенсора.

Ключевые слова: магнитная микро- и наногранула, магниторезистивный биосенсор, градиентное магнитное поле.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес вызывает использование магнитных микро- и наногранул (НГ) в различных областях медицины, биофизики и химии [1]. Это направление науки и техники привело к созданию относительно нового раздела гидродинамики — феррогидродинамики [2, 3]. Одной из важных практических задач является управление поведением таких НГ. Одно из решений этой задачи — использование градиентного магнитного поля, которое создается либо постоянными токами, либо магнитами.

Одним из важных приложений являются магниторезистивные (МР) биосенсоры, в которых производится управление осаждением НГ с антигенами на подложку, покрытую антителами, в жидком растворе [4]. Ввиду микроскопических размеров всей системы, процесс осаждения микрогранул может занимать достаточно длительное время, за которое физические параметры раствора могут измениться (например, часть жидкости испариться). В связи с этим возникает проблема ускорения процесса осаждения НГ. Данная работа посвящена теоретическому исследованию возмож-

ности управления скоростью осаждения НГ внешним градиентным магнитным полем.

ОСАЖДЕНИЕ НГ В ОТСУТСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим НГ, находящуюся в жидкости на высоте z_0 с начальной скоростью v_0 , направленной вдоль вертикальной оси z . Очевидно, что уравнение движения для такой НГ будет иметь вид: $M\ddot{z} = -Mg + F_{\text{Арх}} + F_{\text{тр}}$.

Если НГ имеет сферическую форму, то ее масса $M = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_{\text{Гр}}$, где a — радиус сферы; $\vec{F}_{\text{Арх}}$ и $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила Архимеда и сила вязкого трения. Сила Архимеда в случае сферической формы НГ будет иметь вид: $|\vec{F}_{\text{Арх}}| = \rho_{\text{ж}} \frac{4}{3}\pi a^3 g$, а силу вязкого трения определим по формуле Стокса: $|\vec{F}_{\text{тр}}| = 6\pi\eta a \dot{z}$, где η — динамическая вязкость жидкости. В результате получим следующую задачу Коши для рассматриваемого уравнения движения:

$$\begin{cases} M\ddot{z} = -\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_{\text{Гр}}g + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_{\text{ж}}g - 6\pi\eta a \dot{z}; \\ z(0) = z_0; \\ \left. \frac{dz}{dt} \right|_{t=0} = v_0. \end{cases}$$

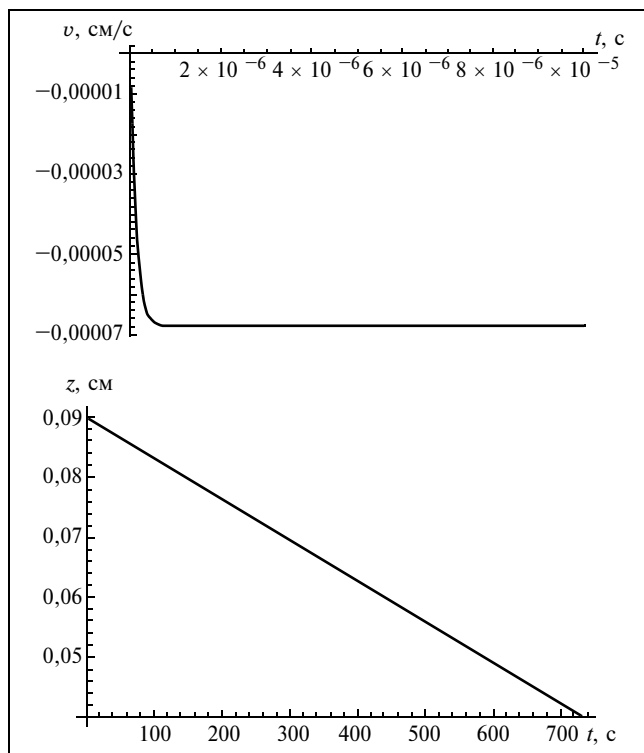


Рис. 1. Графики зависимости скорости и координаты НГ от времени в отсутствие внешнего магнитного поля

Для упрощения расчета удобно ввести обозначения: $\alpha \equiv \frac{6\pi\eta a}{M}$ и $\gamma \equiv g\left(1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{Гр}}}\right)$, тогда уравнение движения запишется в виде: $\ddot{z} + \alpha \dot{z} = -\gamma$.

Решая это неоднородное уравнение с использованием метода неопределенных коэффициентов и учитывая начальные условия, получим:

$$z(t) = z_0 + \left(v_0 - \frac{\gamma}{\alpha}\right)t + \frac{\gamma}{\alpha^2}(1 - e^{-\alpha t});$$

$$v(t) = v_0 - \frac{\gamma}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}). \quad (1)$$

На рис. 1 приведены графики зависимостей $v(t)$ и $z(t)$, построенные по формулам (1), для НГ радиусом 0,5 мкм, плотностью 2,25 г/см³, падающей в воде с высоты 0,9 мм на подложку высотой 0,4 мм. Из графика видно, что скорость НГ устанавливается и становится практически постоянной за время порядка 10⁻⁶ с. Для выбранных выше параметров время осаждения, согласно формулам (1), будет составлять около 12 мин.

ДВИЖЕНИЕ НГ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В присутствии магнитного поля на НГ будет действовать добавочная ponderomotorная сила так, что уравнение движения примет вид: $M\ddot{z} = -Mg + F_{\text{Арх}} + F_{\text{тр}} + F_{\text{магн}}$.

Будем рассматривать НГ как магнитный диполь. В этом случае ponderomotorная сила, действующая на нее во внешнем магнитном поле, определяется выражением:

$$F_{\text{магн}}^i = m^j \frac{\partial B_j}{\partial x_i},$$

где по одинаковым индексам подразумевается суммирование. Следовательно, для того чтобы определить силу, необходимо знать магнитный момент частицы и градиент внешнего поля.

В табл. 1 приведены значения намагнитченности насыщения и плотности для различных материалов.

Будем считать, что кювета с НГ расположена на оси цилиндрического постоянного магнита, намагнитченного вдоль оси z . Если размеры магнита много больше размеров кюветы, составляющих 40 мкм × 40 мкм × 0,5 мм, то поле в ее пределах является практически однородным.

Используя модель магнитных зарядов [5], определим поле на оси цилиндра. Из соображений симметрии очевидно, что оно будет иметь только составляющую вдоль оси z , которая после интегрирования запишется в виде:

$$B = 2\pi\sigma \left(\frac{l+z}{\sqrt{R^2 + (l+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right).$$

Плотность фиктивных магнитных зарядов равна остаточной намагниченности, которая в свою очередь выражается через остаточную магнитную индукцию $\sigma = M_r = \frac{B_r}{4\pi}$.

Таким образом, окончательно выражение для индукции магнитного поля на оси цилиндрического магнита будет иметь вид:

$$B = \frac{B_r}{2} \left(\frac{l+z}{\sqrt{R^2 + (l+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right). \quad (2)$$

В табл. 2 приведены значения остаточной намагниченности B_r для различных материалов [5, 6].

Зная выражение для магнитной индукции, вычислим производную поля вдоль оси z :

$$\frac{\partial B}{\partial z} = \frac{B_r}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{R^2 + (l+z)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + z^2}} - \frac{(l+z)^2}{[R^2 + (l+z)^2]^{3/2}} + \frac{z^2}{[R^2 + z^2]^{3/2}} \right). \quad (3)$$

На рис. 2 приведены графики зависимости $\partial B / \partial z$ от z внутри кюветы, построенные по формулам (2) и (3), для различных значений R и l магнита с остаточной индукцией $B_r = 14\,200$ Гс с учетом наличия подложки высотой 400 мкм. Видно, что при $R > l$, производную можно аппроксимировать прямой линией. Максимальная ошибка составляет около 1 %.

Таким образом, для магнитов с $R > l \gg z$ в пределах рассматриваемого слоя жидкости пондеро-

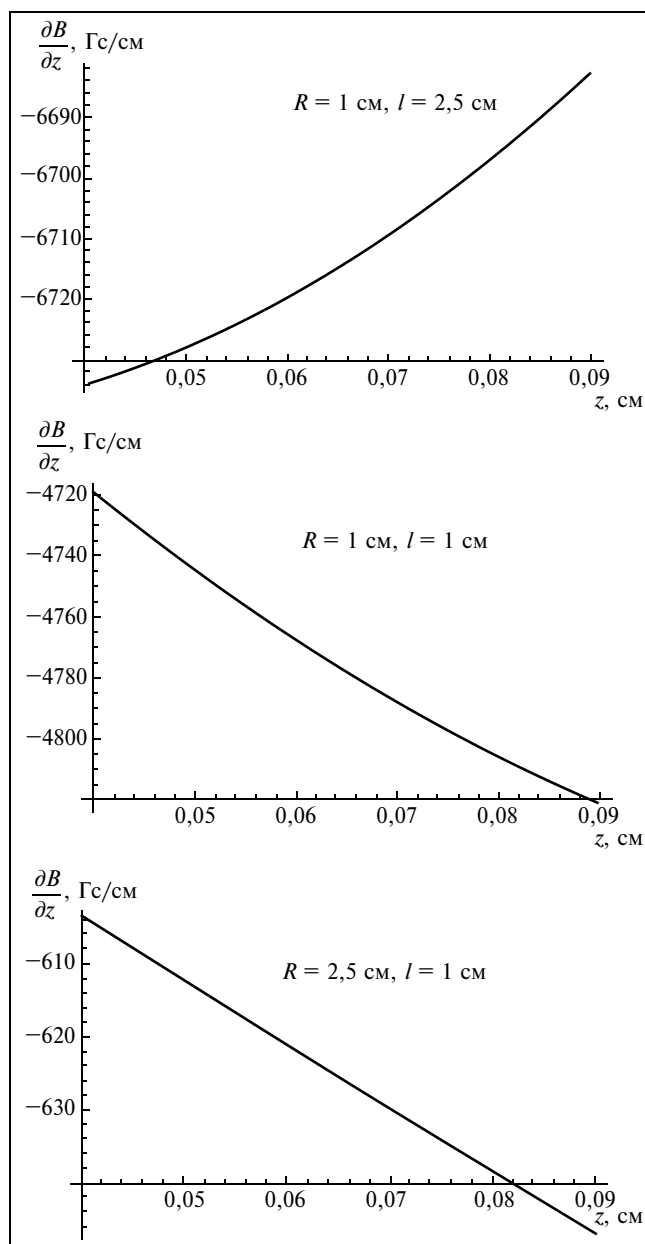


Рис. 2. Зависимость производной магнитной индукции на оси магнита от расстояния по оси z внутри рассматриваемого слоя жидкости для различных размеров магнита с $B_r = 14\,200$ Гс

моторную силу, действующую на НГ, можно представить в виде: $\vec{F}_{\text{магн}} = -m(kz + b)\vec{e}_z$.

С учетом такого выражения для силы второй закон Ньютона и начальные условия для НГ запишутся в виде:

$$\begin{cases} M\ddot{z} = -\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_{\text{гр}} g + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_{\text{ж}} g - 6\pi\eta a \dot{z} - m(kz + b); \\ z(0) = z_0; \\ \left. \frac{dz}{dt} \right|_{t=0} = v_0. \end{cases} \quad (4)$$

Таблица 1

Значения намагниченности насыщения и плотности для различных материалов

Материал	M_s , Гс	$\rho_{\text{гр}}$, г/см ³
Пермаллой	700	8,6
Железо	1714	7,9
ИЖГ ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)	143	5,2
Магнетит (Fe_3O_4)	477	2,2

Таблица 2

Значения остаточной намагниченности для различных материалов

Материал	B_r , Гс
Ферритовые магниты	3000...4000
Керамика (Cu-Ni-Fe)	4000
Альнико (Al-Ni-Co)	13500
Sm-Co	10500
Спеченные (Nd-Fe-B)	14200

Окончательно получим:

$$z(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} - \frac{\beta b + \gamma}{\beta k};$$

$$v(t) = A\lambda_1 e^{\lambda_1 t} + B\lambda_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (5)$$

На рис. 3 приведены графики, построенные по формулам (4) и (5) для НГ радиусом 0,5 мкм, плотностью 2,25 г/см³, падающей в воде с высоты 0,9 мм до высоты 0,4 мм. Видно, что и в этом случае скорость НГ устанавливается за время порядка 10⁻⁶ с, однако она существенно превышает скорость осаждения при отсутствии магнитного поля. Численный расчет дает время осаждения порядка 3 с, при этом ее максимальная скорость составляет около 0,2 мм/с.

В том случае, когда требуется удалить НГ с подложки, можно воспользоваться постоянным магнитом, расположенным над кюветой с жидкостью, чтобы пондеромоторная сила действовала против силы тяжести. Подъем НГ происходит за время того же порядка, что и ее осаждение. Более точные значения приведены в таблицах 3–5.

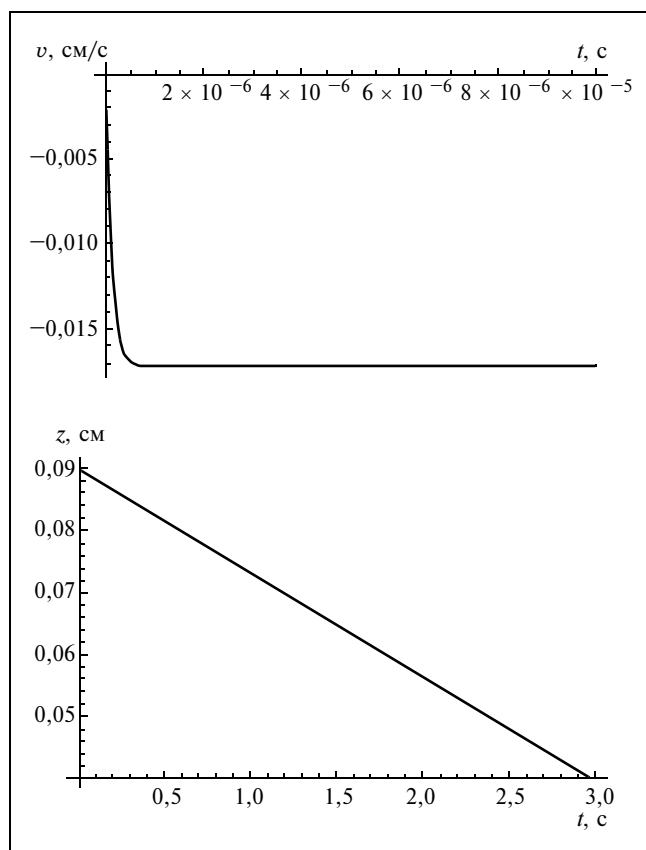


Рис. 3. Графики зависимости скорости и координаты от времени в поле цилиндра с размерами $R = 2,5$ см, $l = 1$ см и остаточной намагниченностью $B_r = 14\,200$ Гс

Таблица 3

Времена подъема и осаждения в воде НГ радиусом 0,5 мкм из различных материалов при отсутствии магнита и в поле магнита размерами $R = 2,5$ см, $l = 1$ см с остаточной намагниченностью $B_r = 14\,200$ Гс

Материал микро-гранулы	Время осаждения без магнита, с	Время осаждения с магнитом, с	Время подъема с магнитом, с
Пермаллой	120,9	2,0	2,1
Железо	133,2	0,8	0,8
ИЖГ	218,7	9,6	10,6
Магнетит	734,2	3,0	3,0

Таблица 4

Времена подъема и осаждения НГ из магнетита радиусом 0,5 мкм при отсутствии магнита и в поле магнита размерами $R = 2,5$ см, $l = 1$ см с остаточной намагниченностью $B_r = 14\,200$ Гс в различных жидкостях

Жидкость	Время осаждения без магнита, с	Время осаждения с магнитом, с	Время подъема с магнитом, с
Вода $\rho = 1$ г/см ³ , $\eta = 1,002$ сП	734,2	3,0	3,0
Бензин $\rho = 0,7$ г/см ³ , $\eta = 0,5$ сП	295,95	1,5	1,5
Глицерин $\rho = 1,3$ г/см ³ , $\eta = 6,05$ сП	5606,5	18,2	18,3

Таблица 5

Времена подъема и осаждения в воде НГ из магнетита радиусом 0,5 мкм в поле магнитов размерами $R = 2,5$ см, $l = 1$ см из различных материалов

Материал магнита	Время осаждения с магнитом, с	Время подъема с магнитом, с
Ферриты	14,0	14,6
Cu-Ni-Fe	10,6	10,9
Sm-Co	4,1	4,1
Al-Ni-Co	3,2	3,2
Nd-Fe-B	3,0	3,0

ВЫВОДЫ

В данной работе продемонстрировано, что присутствие внешнего магнитного поля уменьшает время осаждения НГ в среднем на два порядка в сравнении со временем их осаждения при отсутствии магнитного поля. Показано, что внешнее поле также может быть использовано для подъема НГ с подложки. Получены аналитические выражения для зависимости координаты и скорости НГ от времени в магнитном поле, градиент которого выражается в виде линейной функции от координаты, что позволяет быстро оценить время осаждения или подъема для известных параметров НГ, самого магнита или жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gijss A. M., Magnetic bead handling on-chip: new opportunities for analytical applications // *Microfluid Nanofluid.* — 2004. — Vol. 1. — P. 22–40.
 2. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. — М.: Мир, 1989. — 357 с.
 3. Соколов В. В., Толмачев В. В., Эминов П. А. Гамильтонова форма уравнений феррогидродинамики // Доклады академии наук. — 2009. — Т. 429, № 3. — С. 325–327.
 4. Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М. Биосенсоры на основе тонкопленочных магниторезистивных датчиков // *Автоматика и телемеханика.* — 2010. — № 1. — С. 174–186.
 5. *Физические величины. Справочник* / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
 6. *Таблицы физических величин. Справочник* / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
- Владимир Викторович Амеличев — нач. лабораторией НПК “Технический центр” МИЭТ;
☎ (499) 720-87-79
- Татьяна Николаевна Герасименко — аспирант физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ);
☎ (495) 939-14-35
- Петр Александрович Поляков — д-р физ.-мат. наук, профессор физического факультета МГУ;
☎ (495) 939-14-35
- Сергей Иванович Касаткин — д-р техн. наук, зав. лабораторией Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.
☎ (495) 334-75-79

УДК 681.586.732.389

К содержанию

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

О. К. Гусев, А. И. Свистун, Л. И. Шадурская, Н. В. Яржембицкая

Получены исходные данные для проектирования метрологических характеристик фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей (ФЭПП) на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями. Исследованы диапазоны соответствия энергетической характеристики ФЭПП с многозарядными примесями линейному закону. Показано, что за счет подбора вида глубокой многозарядной примеси можно проектировать ФЭПП с заданной полосой пропускания, улучшенным соотношением сигнал/шум и более высокой температурой эксплуатации. Показано, что благодаря сочетанию управляющего и измерительного оптических каналов в одном фотоприемном устройстве реализуется метод управления спектральной чувствительностью ФЭПП в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, многозарядные примеси, метрологические характеристики.

В последние годы значительное внимание уделяется фотоэлектрическим полупроводниковым преобразователям (ФЭПП) второго поколения, в которых в качестве базового фоточувствительного материала используются высокочистые и совершенные кремний и германий, легированные многозарядными примесями, что позволяет обеспечить высокие фотоэлектрические характеристики и одновременно дешевизну, серийноспособность, высокую надежность и долговечность фотоприемных устройств ИК-диапазона [1].

Использование ФЭПП, как правило, осуществляется в усло-

виях работы на линейном участке его энергетической характеристики [2, 3]. При этом предполагается, что имеет место только один линейный участок энергетической характеристики ФЭПП при плотностях мощности излучения, меньших некоторого порогового значения P_n , определяемого опытным путем.

Метрологические характеристики ФЭПП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями определяются в основном характером рекомбинационных процессов через уровни примеси. Ранее установлено [4, 5], что время жиз-

ни электронов τ_n и дырок τ_p в полупроводниках с глубокими многозарядными примесями может изменяться на порядки величины в зависимости от плотности мощности оптического излучения. В этих условиях существуют две области линейной рекомбинации, т. е. постоянства τ_n , τ_p . Следовательно, может существовать второй линейный участок энергетической характеристики такого ФЭПП при высоких плотностях мощности оптического излучения P .

Целью работы явилось получение исходных данных для проектирования метрологических