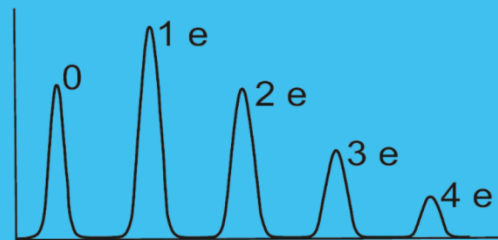
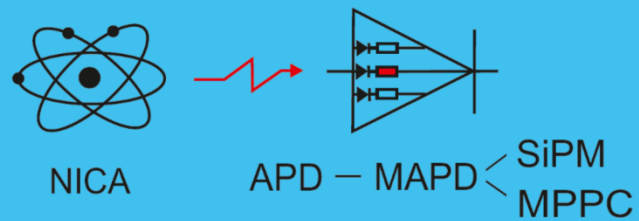


З. Я. САДЫГОВ

# ФИЗИКА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ



### З. Я. САДЫГОВ

Доктор физико-математических наук по специальности  
«Физика полупроводников и диэлектриков»

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.  
E-mail: [zsadygov@gmail.com](mailto:zsadygov@gmail.com) ; моб.т.: +7 903 571 97 00

Монография написана по собственной инициативе и посвящается 40-летней научной деятельности автора по разработке полупроводниковых лавинных фотоприемников.

Объем работы: 140 страниц, в том числе 65 рисунков и 220 цитированных работ.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

Глава 1. Основные свойства полупроводников

Глава 2. Полупроводниковые р-п – переходы в сильных электрических полях

Глава 3. Традиционные лавинные фотоприемники

Глава 4. Микропиксельные лавинные фотоприемники

Глава 5. Моделирование работы МЛФД (SiPM) детекторов

## Немного об истории разработки

“Практически все ламповые приборы заменены полупроводниковыми, можно ли заменить вакуумный ФЭУ на полупроводниковый ФЭУ?”

Академик М. А. Марков.  
1983 год, ИЯИ АН СССР

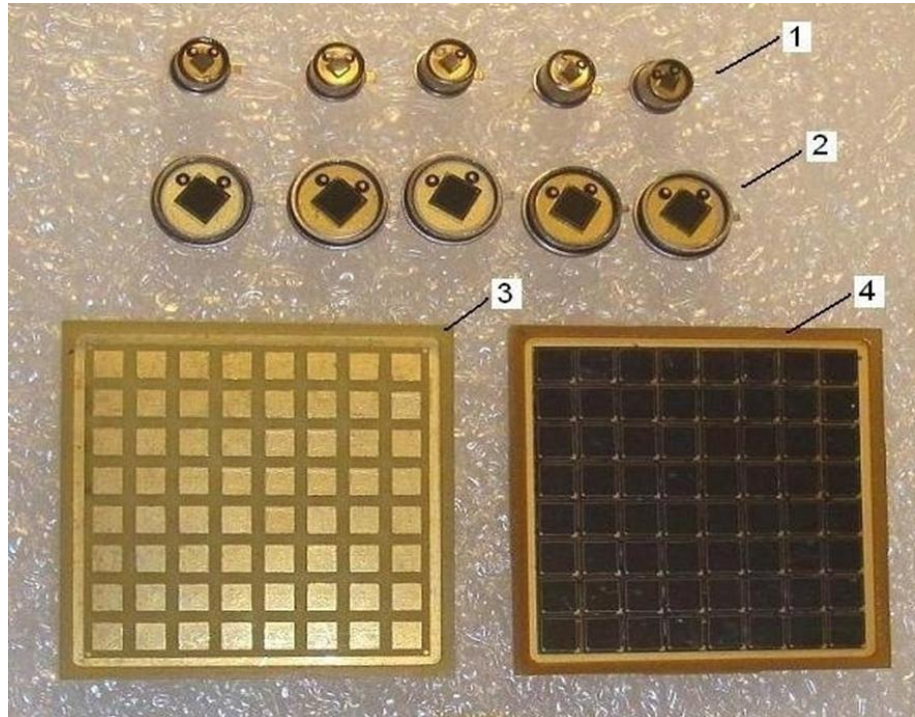
## Два разных подхода к разработке новых ЛФД

В 80-е годы существовали два подхода к разработке новых ЛФД:

1. Постепенное улучшение технологии (чистоты) изготовления ЛФД с целью уменьшения плотности микро-неоднородностей в приборе. Этим направлением преимущественно занимались в развитых странах (США, ЕС, Япония и др.). Были разработаны новые поколения ЛФД с высоким коэффициентом усиления (от 100 до 1000) и низким коэффициентом избыточного шума ( $\sim 2$ ) для различных применений. Тем не менее, ни один из этих новых ЛФД не имел одноэлектронного разрешения, если не считать VLPC, работающего при температуре 7К.
2. Исследование лавинного процесса в различных многослойных полупроводниковых структурах с целью поиска новых способов снижения влияния неоднородностей полупроводника на качество лавинного процесса. Этим направлением преимущественно занимались в развивающихся странах, в том числе в СССР (затем в России и СНГ), поскольку технология была на низком уровне.

Второй подход был выбран нашей творческой группой (А. Гасанов, В. Головин, З. Садыгов, М. Тарасов и Н. Юсипов) **в 1983 году.**

# Образцы МЛФД



# Наш МЛФД в проектах COMPASS и NICA

## 2.6.3 Фотодетектор ECAL

Детектор фотонов должен будет работать в магнитном поле величиной до 0,5 Тл. В этом случае лучшим кандидатом на роль такого детектора является микропиксельный лавинный фотодиод — фотодетектор новейшей конструкции с многопиксельной внутренней структурой на общей кремниевой подложке. В улучшенной модификации детектора MAPD с микроканалом для сбора заряда плотность пикселей составляет более  $10^4/\text{мм}^2$  [242]. Каждая независимая лавинная область (вертикальные каналы) с отдельными микроканалами для сбора заряда создается на глубине около 3-5 мкм при помощи особого распределения внутреннего электрического поля. Сбор заряда в отдельных микроканалах обеспечивает локальное самогашение лавинных процессов в детекторе MAPD.

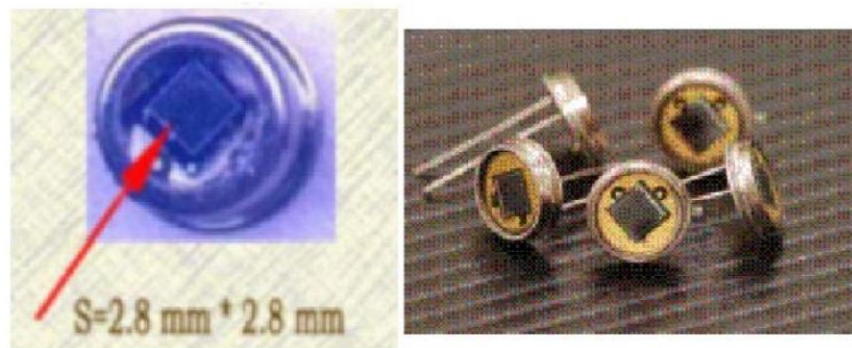


Рис. 2.63: Детектор MAPD.

Многоцелевой детектор MPD, Версия 1.4. стр.120-121.

[https://nica.jinr.ru/files/CDR\\_MPDP/MPD\\_CDR\\_ru.pdf](https://nica.jinr.ru/files/CDR_MPDP/MPD_CDR_ru.pdf)

О необходимости подобной монографии по теме:

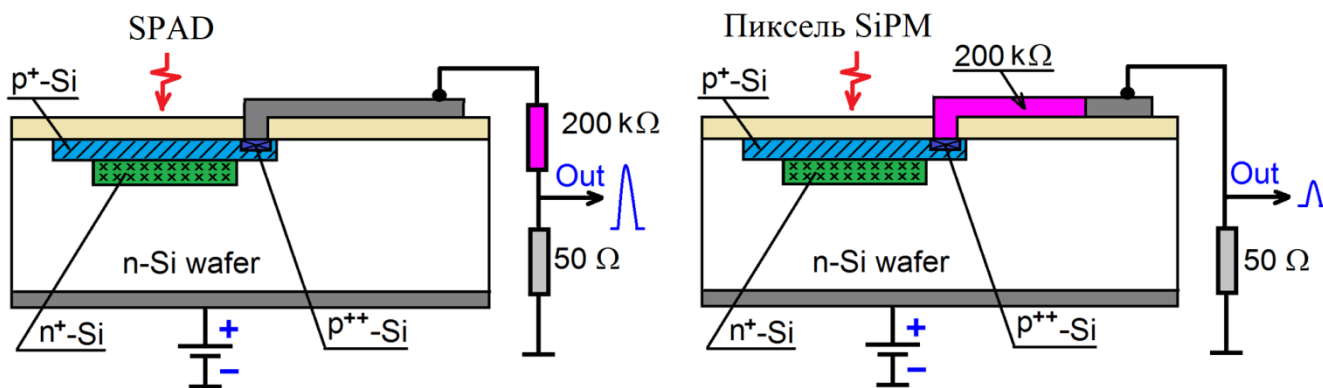
1. Широкое применение Si-ФЭУ во многих физических экспериментах и отсутствие литературы, детально описывающей его функционирование;
2. Некорректное толкование физики работы Si-ФЭУ, например, «Si-ФЭУ состоит из матрицы известных SPAD детекторов, работающих в режиме известного газового счетчика Гейгера» или «Лавинный процесс в пикселе гасится, когда напряжение на нем опускается до напряжения пробоя»;
3. Возможность улучшения параметров существующих и разработка новых лавинных приборов.



## Действительно ли Si-ФЭУ состоит из матрицы известных SPAD детекторов?

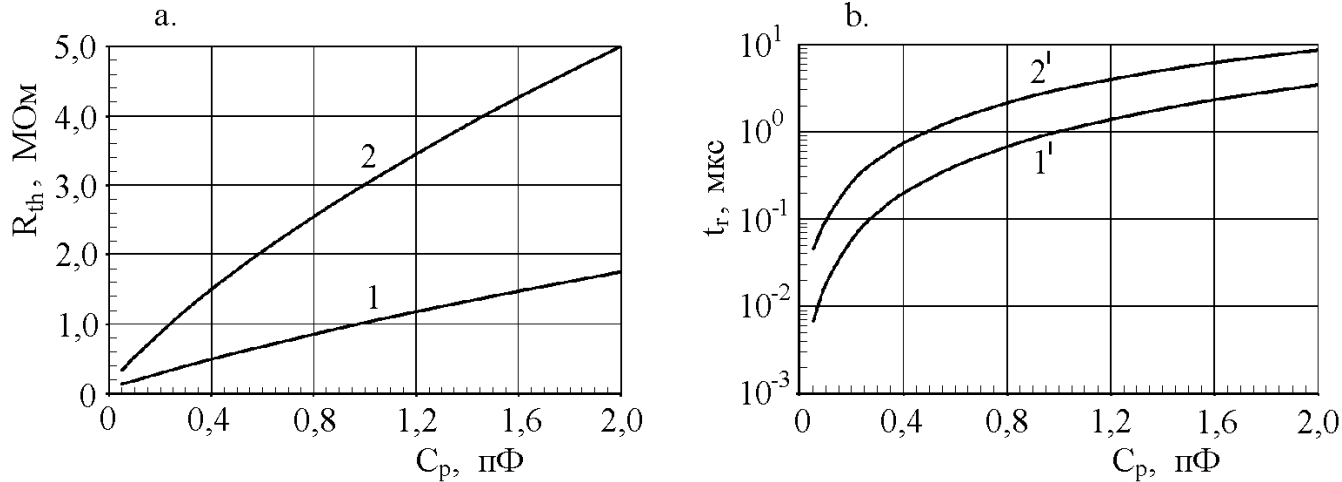
Если так, то возникают следующие вопросы:

1. Почему внешний активный элемент гашения (электронный блок) необходим для быстрого ( $\sim 10$  нс) гашения лавинного процесса в традиционных детекторах SPAD?
2. Почему 1000 пикселей MAPD (или SiPM) быстро ( $\sim 10$  нс) гасятся без какого-либо активного гасящего элемента?
3. Почему SiPM не был создан в 70-е годы, когда SPAD детекторы быстро развивались?



При каком минимальном потенциале гасится лавинный процесс в пикселе SiPM и в SPAD детекторе?

Все определяется величинами  $R_S$  и  $C_p$



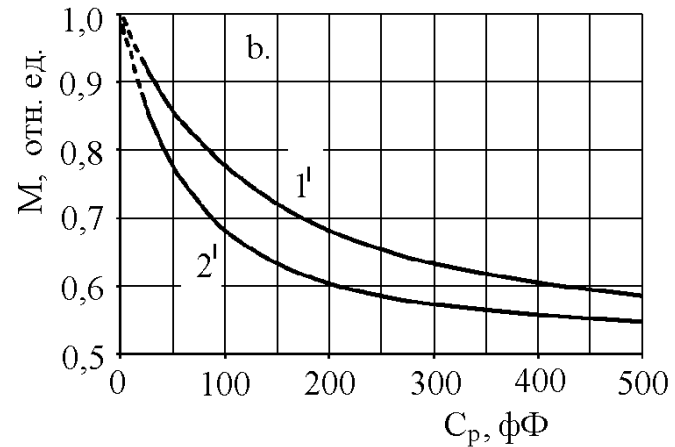
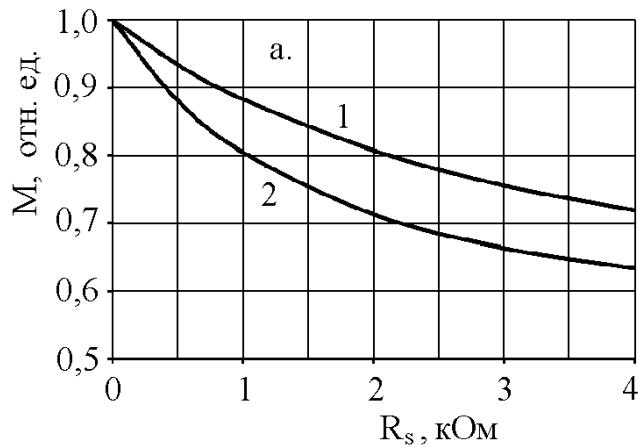
Зависимость порогового значения гасящего лавину сопротивления  $R_{th}$  и характерного времени релаксации  $t_r$  от емкости пикселя: 1 и 1' –  $R_S = 2 \text{ k}\Omega$ ; 2 и 2' –  $R_S = 4 \text{ k}\Omega$ .

$$U_{dis} = m \times \Delta U_{ov}, \quad m=1 \dots 2., \quad Q_e = m \times C_{tot} \times \Delta U_{ov},$$

$$C_{tot} = C_p + C_s, \quad C_{eff} = \frac{\partial Q_e}{\partial (\Delta U_{ov})} = m \times C_{tot},$$

Зависимость нормированных значений коэффициента усиления от сопротивления пространственного заряда  $R_S$  и емкости пикселя  $C_p$ .

$$R_S = \frac{W^2}{2\varepsilon\varepsilon_S v_S S_p} = \frac{1}{2\varepsilon\varepsilon_S v_S} \times \left(\frac{W}{D_{av}}\right)^2 \approx 60 \times \left(\frac{W}{D_{av}}\right)^2 \text{ кОм}$$



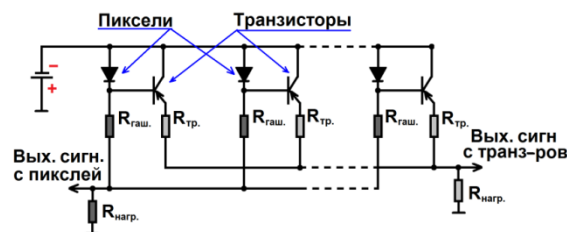
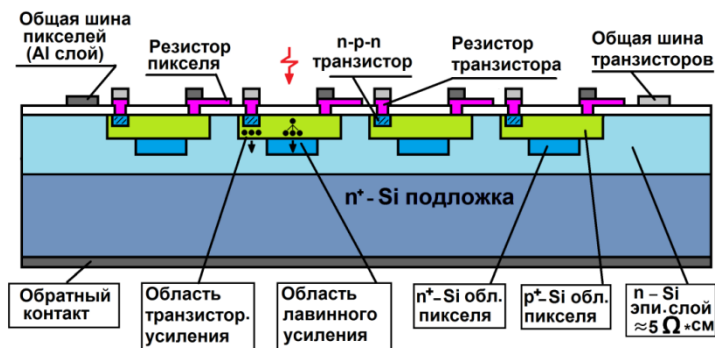
1 –  $C_p = 20 \text{ fF}$ , 2 –  $C_p = 40 \text{ fF}$ , 1' –  $R_S = 0,5 \text{ k}\Omega$ , 2' –  $R_S = 1 \text{ k}\Omega$ .

## Проблемы SiPM

Ограничение чувствительной площади, после-импульсы  
и перекрестные оптические наводки

## Перспективные конструкции

### Микропиксельный лавинный фототранзистор (МЛФТ)

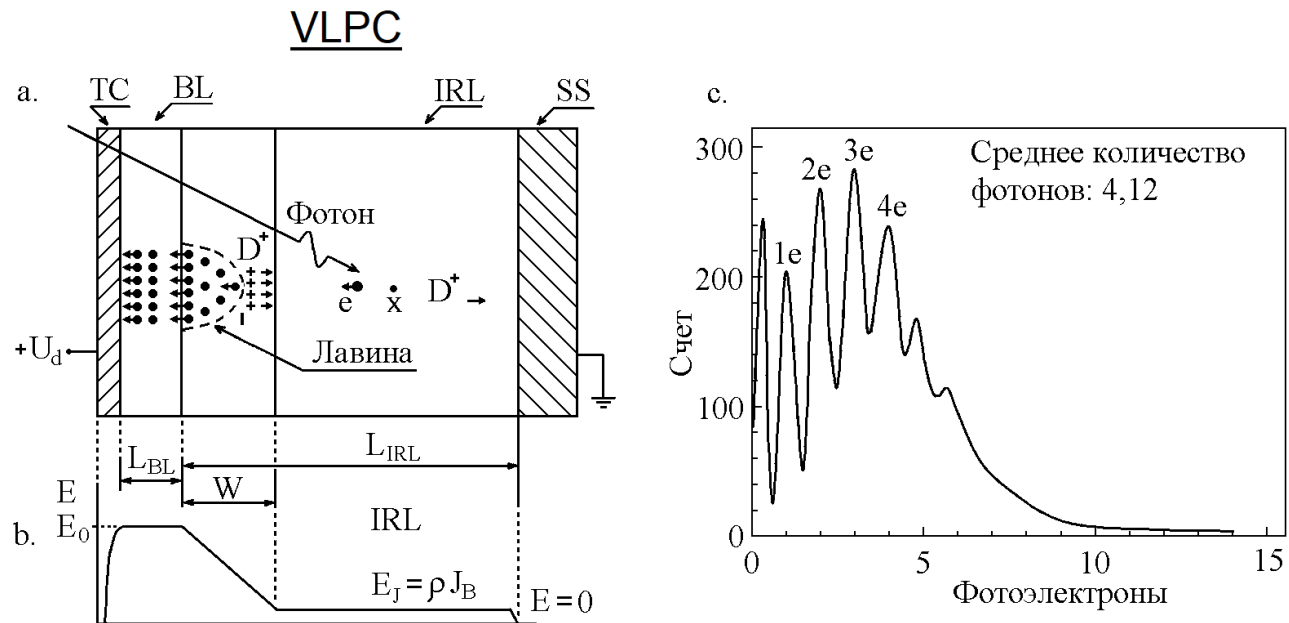


Эквивалентная схема МЛФТ

Появление фотоэлектрона в пикселе вызывает там быстрый ( $\approx 50$  пс) лавинный процесс с коэффициентом усиления, например  $10^5$ , и в результате этого, на гасящем резисторе, а также на базе микротранзистора, падает напряжение величиной около  $2 \div 5$  В, достаточное для полного открытия перехода база-эмиттер. Величина коллекторного тока при этом ограничивается балластным резистором микротранзистора с сопротивлением в 20 раз меньше, чем сопротивление гасящего лавину резистора. В этом случае, за счет усиления транзистора, общее усиление прибора достигает  $10^6$ . Таким образом, за счет уменьшения лавинного усиления значительно уменьшается вероятность появления «после-импульсов».

## Перспективные конструкции

Известный счетчик видимых фотонов, работающий при  $T=7\text{K}$



Сечение конструкции (а), профиль электрического поля (b) и амплитудное распределение выходных импульсов (с) счетчика видимых и инфракрасных фотонов.

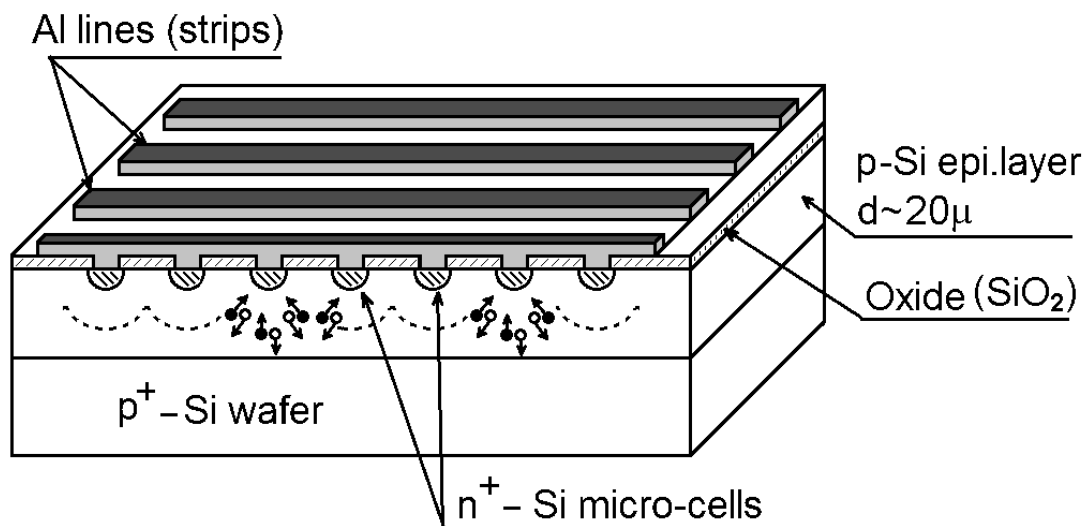
## Перспективные конструкции

### Новый VLPC

Насыщение коэффициента умножения электронов может быть связано с двумя факторами. Первый фактор – экранировка электрического поля в лавинной области полем донорных примесей, ионизированных самим лавинным процессом. Второй фактор связан с конечностью количества не ионизированных донорных примесей в лавинной области. Если хотя бы один из этих факторов имеет место, то это дает возможность создания детектора такого типа, работающего при комнатной температуре. Для этого можно использовать широкозонный полупроводник (или диэлектрик), легированный соответствующими примесями.

## Перспективные конструкции

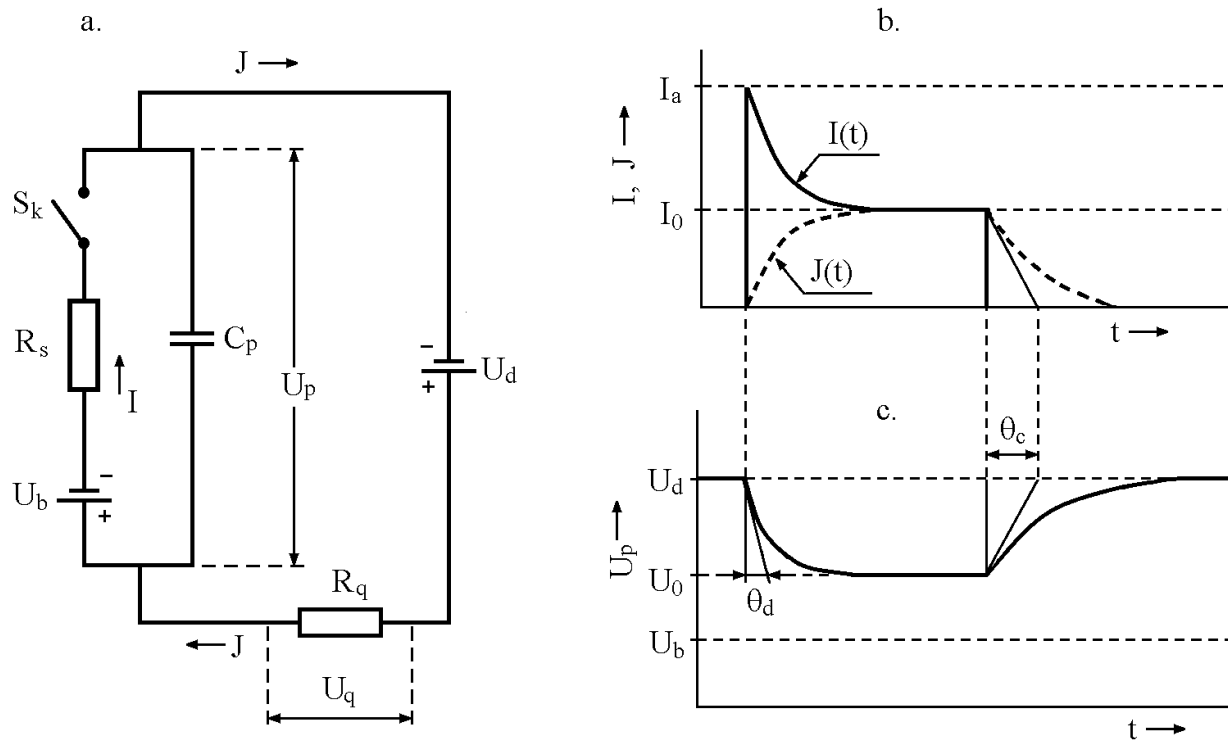
### Лавинный стриповый детектор



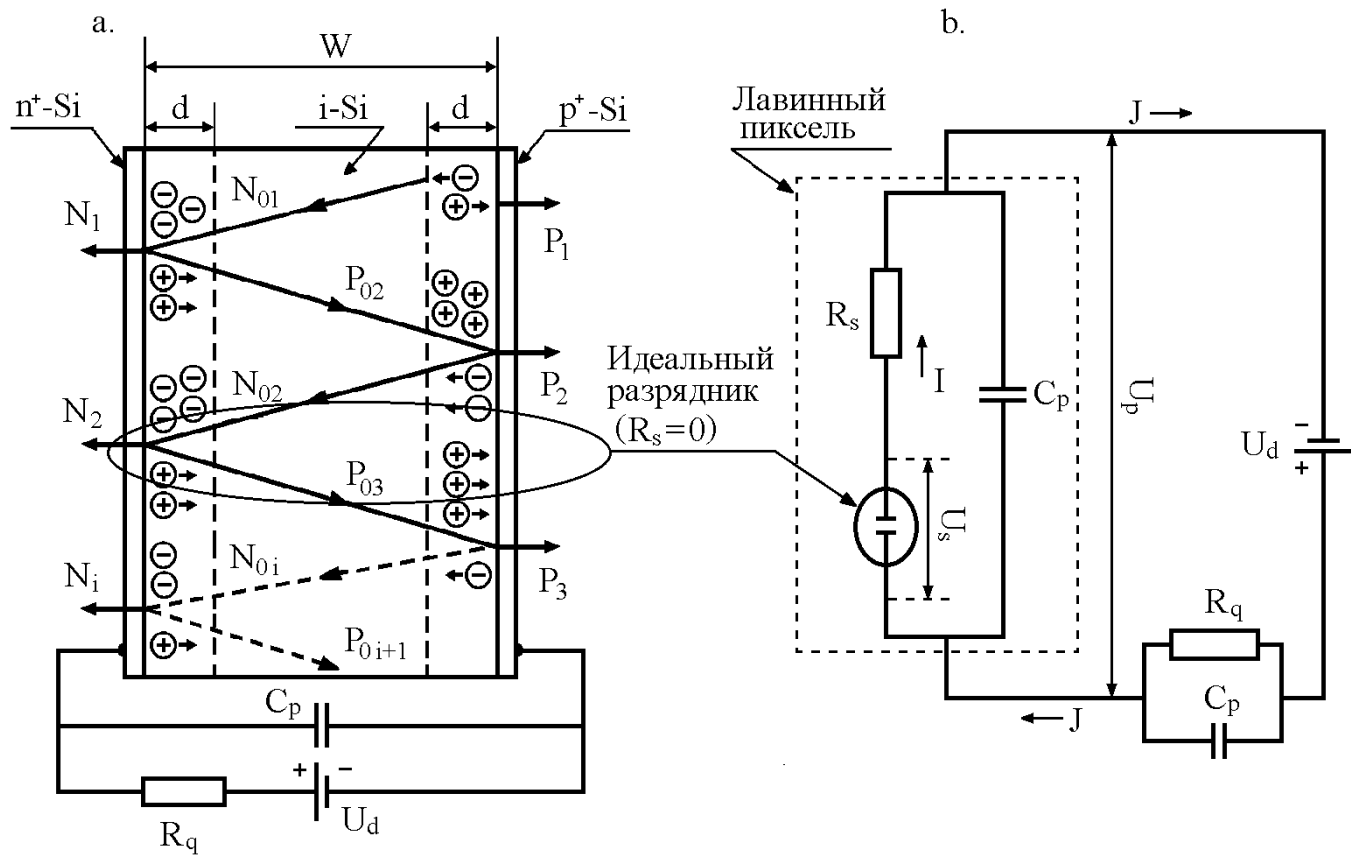
Возможность изготовления детектора подтверждена экспериментальными результатами автора. Показано, что лавинный кремниевый фотодиод, содержащий матрицу из высоколегированных полусферических областей (пикселей), имеет однородный коэффициент усиления около 200 по всей рабочей площади, равной 3мм\*3мм.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**



Модель Р. Хайтза: а – эквивалентная схема, б – эюра токов, с – эюра потенциала на выводах лавинного диода.



Эквивалентные электрические схемы пикселя МЛФД:

а. – идеальная эквивалентная схема, когда  $C_q = 0$  и  $R_s = 0$ ;

б. – реальная эквивалентная схема, учитывающая паразитную емкость  $C_q$  и сопротивление  $R_s$  ОПЗ пикселя.

