



R. T. G0402-0008

Catania, 07/06/2002

Single Photon Avalanche Diode

Misure di efficienza quantica di SPAD 6''

Abstract: *Nel presente lavoro vengono illustrate le curve di efficienza quantica di SPAD a 6''. Il valore massimo si ha ad una lunghezza d'onda di 550 nm. Si è studiato l'andamento dell'efficienza quantica al variare del diametro dell'area attiva del dispositivo e dell'intensità della tensione di polarizzazione. SPAD con diametro dell'area attiva di 50 μm presenta una efficienza del 50 %. Si è inoltre verificata la linearità della risposta di SPAD al variare dell'intensità del fascio luminoso incidente.*

Autori: *C. Di Franco (STM), D. Sanfilippo (STM), R. Cosentino (INAF-OAC), E. Sciacca (CNR-IMM), M. Belluso (INAF-OAC)*

Responsabile: *P. G. Fallica (STM), G. Bonanno (INAF-OAC), S. Lombardo (CNR-IMM) .*

Lista di distribuzione:

D. Ballarò	[STM]	S. Lombardo	[CNR-IMM]
G. Bonanno	[INAF-OAC]	A. Patti	[STM]
S. Catalano	[INAF-OAC]	E. Rimini	[CNR-IMM]
G. Cerofolini	[STM]	S. Scuderi	[INAF-OAC]
S. Coffa	[STM]	C. Spinella	[CNR-IMM]
P.G. Fallica & group	[STM]	S. Torre	[STM]
G. Ferla	[STM]	P. Vasquez	[STM]
F. Frisina	[STM]	E. Viscuso	[STM]

INTRODUZIONE

Uno SPAD è una giunzione p-n che opera a valori di tensione di polarizzazione superiori alla tensione di breakdown. In corrispondenza di tali valori, il campo elettrico è così elevato che una coppia elettrone-lacuna, generata nella zona di svuotamento, per effetto dell'interazione del diodo con un fotone, è in grado di innescare una valanga, determinando passaggio di corrente. In queste condizioni di polarizzazione, il diodo funziona da rivelatore di singoli fotoni. La corrente di valanga continua a fluire finché la tensione non viene riportata al di sotto del valore di breakdown; successivamente, dopo un tempo, detto tempo di hold off, le condizioni di polarizzazioni iniziali vengono ripristinate ed il sistema è pronto per rivelare l'arrivo di un nuovo fotone. Il diodo viene pilotato mediante un opportuno circuito chiamato circuito di quencing attivo (AQC).

La bontà di uno SPAD è valutata sulla base di alcuni parametri fondamentali, quali dark counts, afterpulsing ed efficienza di rivelazione. Analizziamo in dettaglio ciascun parametro.

La generazione termica dai livelli energetici più profondi determina, anche in assenza di illuminazione, impulsi di corrente (dark counts). Il numero di conteggi di buio consente di ottenere una misura del rumore intrinseco di uno SPAD e quindi il limite di rivelazione dello stesso nella misura di flussi luminosi molto deboli. Il numero di conteggi di buio aumenta all'aumentare della sovratensione applicata. Questo può essere spiegato invocando i seguenti fenomeni: all'aumentare del valore di tensione applicata aumenta il valore del campo elettrico e, conseguentemente la velocità di emissione dai centri di generazione; inoltre aumenta la probabilità di innescare la valanga e il volume della zona svuotata.

Contributo significativo al dark count può essere dato dall'effetto di afterpulsing.

Chiariamo in primo luogo cosa determina l'insorgenza di afterpulsing. Si è già detto che il breakdown negli SPAD avviene per valanga; durante la valanga alcuni portatori possono essere catturati, nella zona di svuotamento, dai livelli intrappolanti, ed essere rilasciati dopo un certo intervallo di tempo. Tale ritardo dipende dall'energia dei livelli coinvolti. Se esso è superiore al tempo di hold off, i portatori, una volta rilasciati, possono a loro volta innescare una ulteriore valanga generando afterpulsing. Il numero di portatori catturati dipende dalla quantità di carica totale della valanga. Pertanto l'afterpulsing aumenta all'aumentare del tempo di spegnimento della valanga e dell'intensità di corrente, a sua volta proporzionale alla sovratensione applicata.

Gli SPAD sono rivelatori di fotoni, importante quindi è valutare l'efficienza di rivelazione.

Perché un fotone sia rivelato è necessario non solo che esso incida sull'area attiva del dispositivo e generi una coppia elettrone-lacuna, ma anche che, a sua volta, la coppia generata inneschi la valanga. Pertanto all'aumentare dell'intensità del campo elettrico, e quindi per sovratensioni più elevate, aumenta la probabilità che si inneschi valanga e, conseguentemente, l'efficienza di rivelazione.

Nei paragrafi successivi si mostreranno i valori di efficienza quantica misurati per SPAD. Tale lavoro si inserisce nell'ambito delle attività di ricerca svolte in collaborazione con l'Osservatorio Astrofisico di Catania e il CNR – IMM, sezione di Catania.

In data 01/02/2001 è stata stipulata fra STMicroelectronics e l'Osservatorio Astrofisico una convenzione che regola le attività di collaborazione nel campo delle tecnologie

microelettroniche ed, in particolare in tema di rivelatori di fotoni a stato solido per applicazioni astrofisiche, sistemi per il conteggio di fotoni, dispositivi per l'acquisizione di immagini da sorgenti deboli ed, inoltre, di microelettronica ed elettronica di Front-end.

APPARATO SPERIMENTALE

Le misure di efficienza quantica sono state effettuate presso l'Osservatorio Astrofisico di Catania. In figura 1 si può osservare l'apparato sperimentale usato, mentre in figura 2 vi è uno schema a blocchi dello stesso.

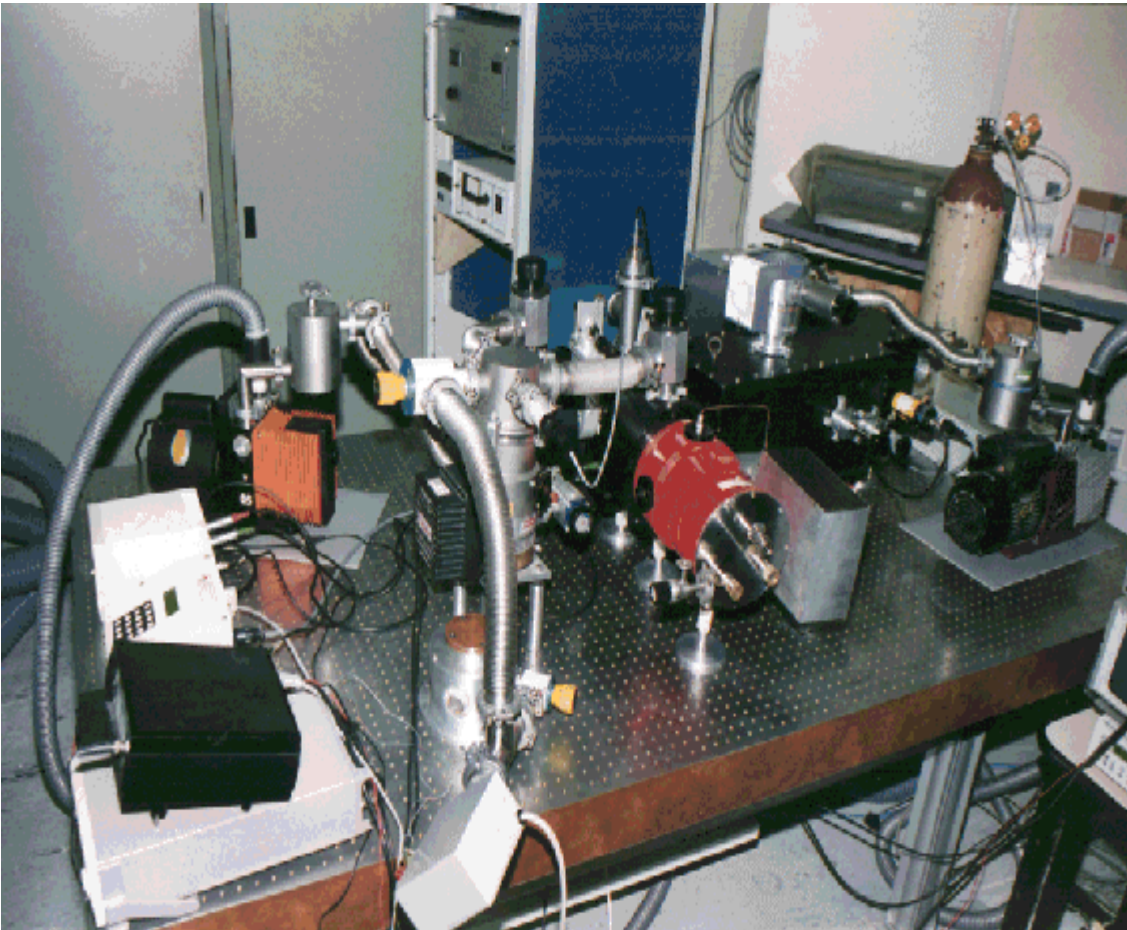


Figura 1: Banco ottico usato per misurare l'efficienza quantica di SPAD.

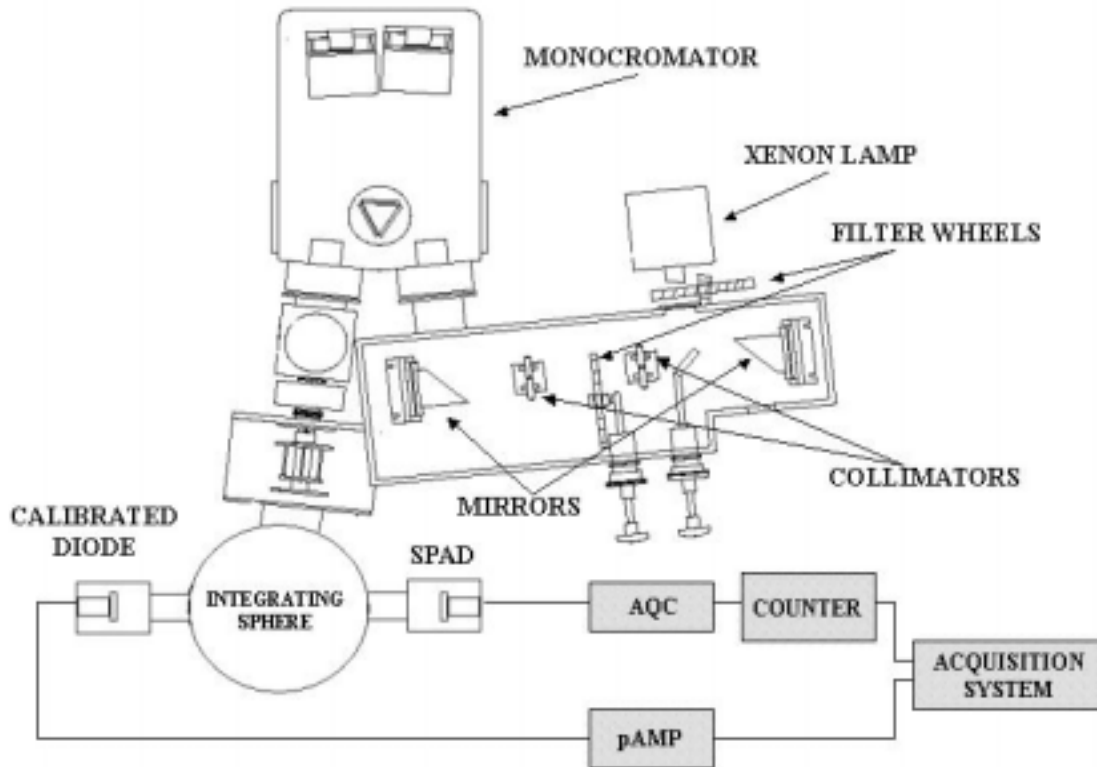


Figura 2: Diagramma a blocchi del sistema ottico.

Il sistema ottico (figura 2) è formato da una lampada a xenon, una ruota con filtri neutri, aventi coefficiente di attenuazione di 0.1, 0.5, 0.01, 1e-3, 1e-4, 1e-5 e 1e-6, uno specchio piano, una ruota con dei filtri colorati. I filtri colorati utilizzati sono di seguito elencati:

- UG11 usato fra 300 e 400 nm, banda passante 100 nm e λ a 350 nm;
- BG12 + BG39 usati in un range spettrale compreso fra 400 e 500 nm; banda passante 100 nm e λ a 450 nm;
- GG495 + BG39 tra 500 e 600 nm, banda passante 100 nm e λ a 550 nm;
- OG530 + BG38 tra 600 e 700 nm, banda passante 100 nm e λ 650 nm;
- RG695 + BG1 tra 700 e 950 nm, banda passante 250 nm e λ 800 nm.

Il sistema ottico è inoltre costituito da un monocromatore, una sfera integratrice, la camera dello spad ed il diodo calibrato NIST.

Il monocromatore presenta una risoluzione di 0.3 Å ed una dispersione lineare di 1.67 nm/mm, pertanto la banda passante è di 3.34 nm in corrispondenza di una fenditura di uscita di 2 mm.

La sfera integratrice ha un diametro di 8", riflettività di circa 0.97 per lunghezze d'onda comprese fra 350 e 1000 nm.

Il primo stadio dell'ottica, formato da specchi e diaframmi, adatta il fascio emesso dalla lampada a xenon alla focale del monocromatore. La luce emessa dalla lampada attraversa la ruota, equipaggiata dai filtri neutri, viene successivamente filtrata da un filtro colorato

per eliminare gli ordini superiori e quindi focalizzata da uno specchio parabolico sulla fenditura di ingresso del monocromatore. Il monocromatore (Acton Research Corporation, modello VM504) ha una focale di 0.39 m ed un'apertura di f/5.4.

Il fascio d'uscita del monocromatore, dopo essere stato disperso, entra nella sfera integratrice, dove sono montate, alla stessa distanza dalla sfera, le due camere che ospitano lo SPAD ed il diodo calibrato NIST. Lo scopo della sfera integratrice è garantire che il flusso di fotoni sia uniforme ed abbia la stessa intensità sia sullo SPAD che sul fotodiode calibrato.

In figura 3 è possibile osservare la curva di efficienza quantica del fotodiode.

Le misure dei conteggi dello SPAD sono effettuate contemporaneamente a quelle della corrente del diodo calibrato sì da garantire l'indipendenza delle misure da eventuali fluttuazioni della sorgente.

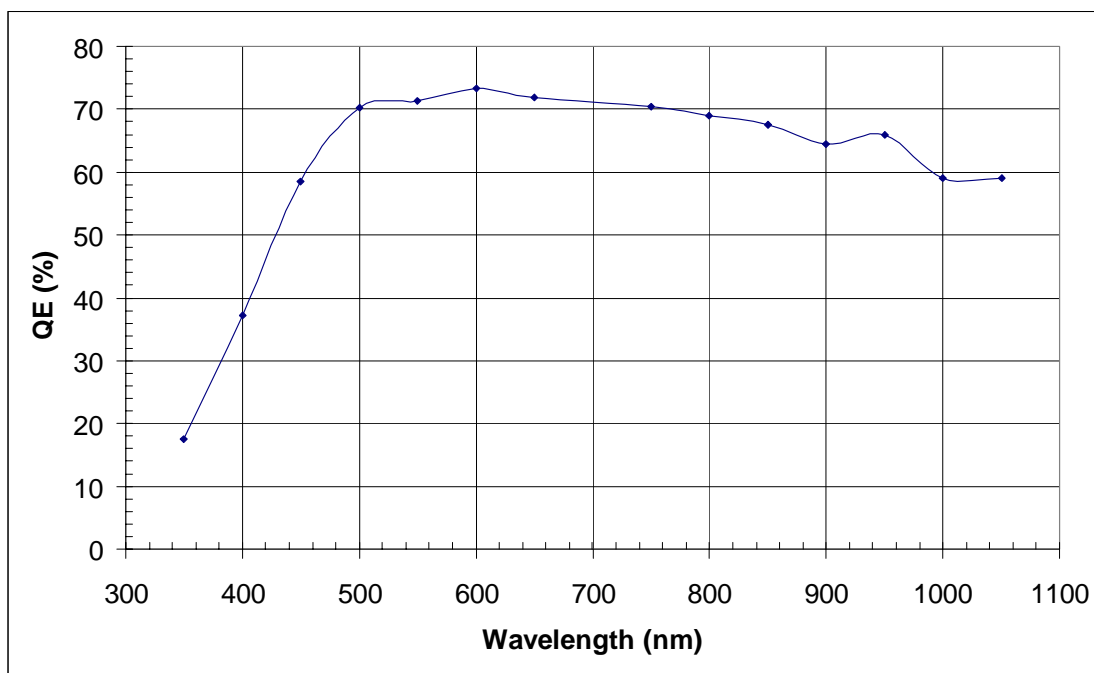


Figura 3: Curva di efficienza quantica del fotodiode NIST.

Le misure sono state condotte su dispositivi, appartenenti al modulo 5 del layout di SPAD, assemblati su package ceramico da 32 pins. In figura 4 e 5 vengono mostrati gli schemi di taglio (passo: $x=4000 \text{ \AA}$ e $y=5000 \text{ \AA}$) e bonding.

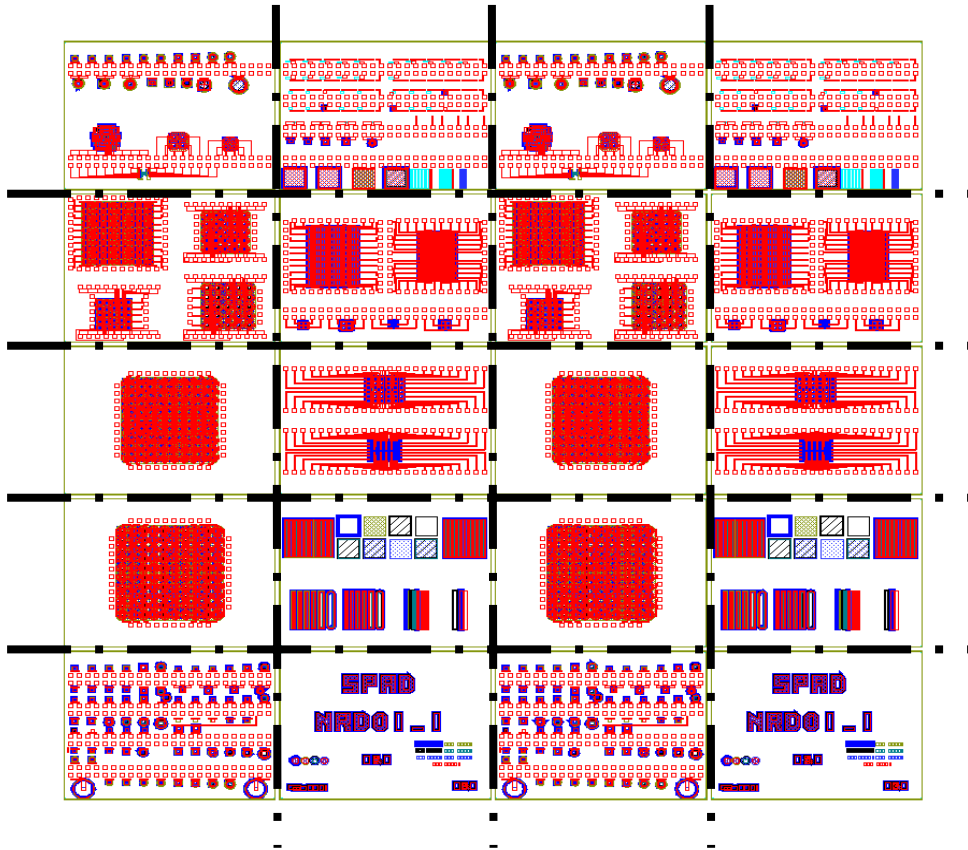


Figura 4: Schema di taglio del layout di SPAD.

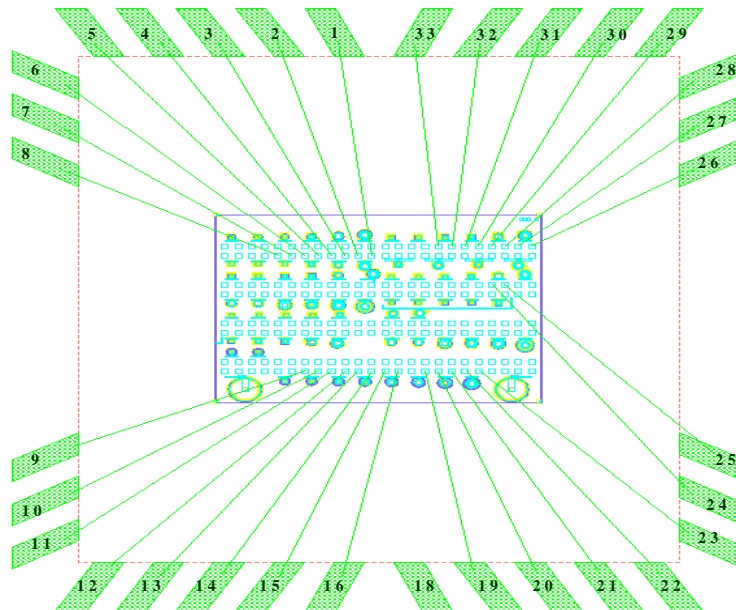


Figura 5: Schema di bonding del modulo 5.

MISURE DI EFFICIENZA QUANTICA

Si è scelto di effettuare le misure di efficienza quantica sui dispositivi SING-MIN (dimensioni minime consentite dalla tecnologia), con diametro dell'area attiva di 10, 20, 50, 100 μm .

In primo luogo è stato estrapolato il valore della tensione di breakdown, fittando le misure I-V, a differenti valori di corrente: 100, 500, 600 e 636 μA . In tabella 1 sono riportati i valori misurati e quelli estrapolati. Per valutare più accuratamente il valore di tensione di rottura, in un prossimo set di esperimenti si eseguiranno le misure anche a valori di corrente prossimi a 10 μA . Da queste misure è possibile osservare che i dispositivi più piccoli presentano una resistenza in breakdown piuttosto elevata.

Diametro Area Attiva	V @ 100 μA	V @ 500 μA	V @ 600 μA	V @ 636 μA	BV estrapolato da fit lineare (V)	Resistenza di breakdown R_B (Ω)
100 μm	30.61 V	30.75 V	30.8 V	30.81 V	30.57	374
50 μm	30.96 V	31.18 V	31.25 V	31.27 V	30.9	576
20 μm	31.35 V	32.67 V	33.03 V	33.14 V	31.01	3343
10 μm	33.52 V	43.2 V	45.5 V	46.3 V	31.15	23921

Tabella 1: Valori di tensione di breakdown misurati in SPAD con differente diametro dell'area attiva, a diversi valori di corrente.

Una volta determinato il valore della tensione di rottura per i dispositivi presi in esame, si è proceduto alla determinazione dell'efficienza quantica dei campioni. Le misure sono state effettuate a diversi valori di tensione di polarizzazione: 37, 38, 39 e 43 V, in una finestra spettrale compresa fra 350 nm e 1050 nm.

Di seguito vengono riportati i valori di efficienza quantica per SPAD con diametro dell'area attiva di 10, 20, 50 e 100 μm .

- *SPAD, SING - MIN 10 μm :*

La tensione di breakdown del dispositivo è di 31.15 V.

In figura 6 è riportato il confronto fra le curve di efficienza quantica del dispositivo in esame, alle diverse tensioni di polarizzazione. Il massimo di efficienza quantica si ha in corrispondenza di una lunghezza d'onda di 550 nm, inoltre, come già detto in precedenza, l'efficienza quantica aumenta all'aumentare della sovratensione applicata. Infatti per valori di campo elettrico maggiore, aumenta la probabilità che la coppia generata per effetto dell'interazione di un fotone con l'area attiva del diodo, inneschi la valanga, la qual cosa determina un aumento dell'efficienza di rivelazione del dispositivo.

Lambda [nm]	QE [%] @ 37 V	QE [%] @38 V	QE [%] @ 39 V	QE [%] @43 V
350	2.77	3.16	3.56	4.33
400	4.48	5.02	5.70	
450	7.22	8.51	9.32	
500	13.78	15.20	17.09	22.64
550	14.10	16.31	18.25	
600	12.87	14.24	16.88	20.83
650	10.70	11.72	14.10	
750	6.54	7.24	8.47	11.36
800	4.74	5.83	6.20	
850	3.71	3.91	4.65	
900	2.34	2.63	2.91	3.9
950	1.29	1.41	1.67	
1000	0.55	0.79	0.74	0.93
1050	0.085	0.14	0.46	

Tabella 2: Valori di efficienza quantica fra 350 e 1050 nm di SPAD con diametro dell'area attiva di 10 μm , a differenti tensioni.

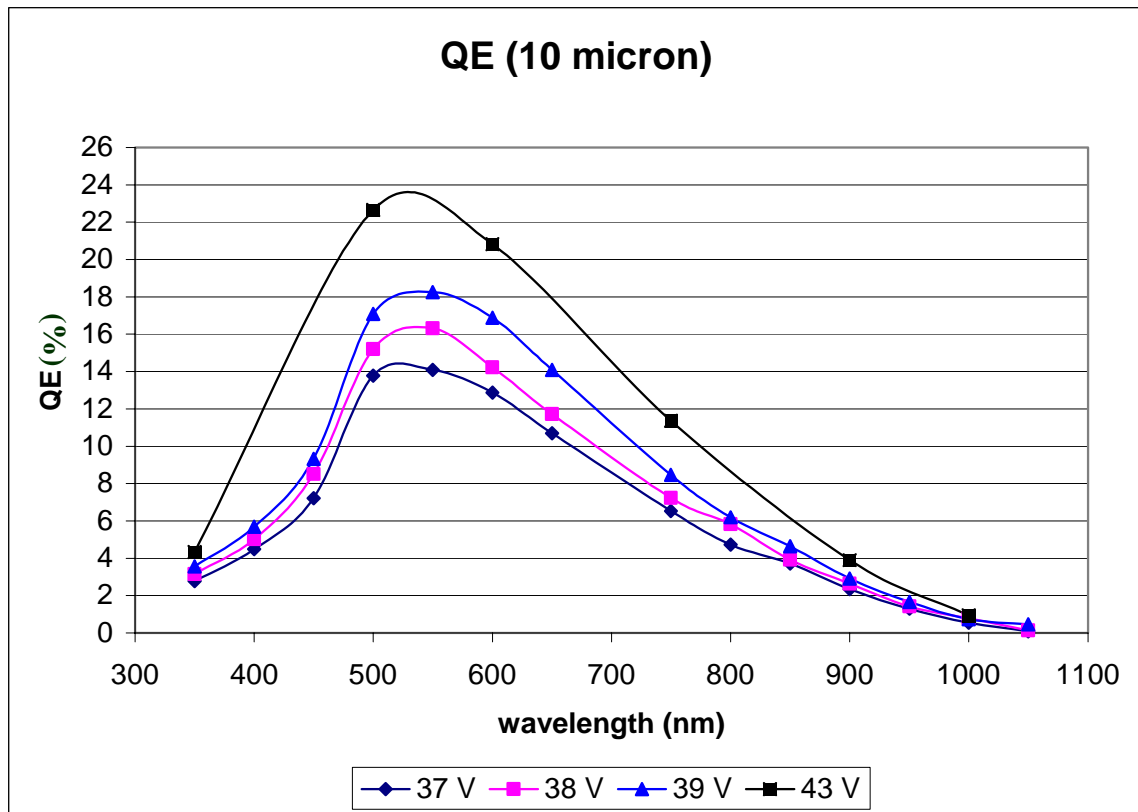


Figura 6: Curva di efficienza quantica di SPAD con diametro dell'area attiva di 10 μm , a differenti tensioni di polarizzazione.

- *SPAD, SING -MIN 20 μm:*

Il dispositivo presenta un valore della tensione di rottura pari a 31.01 V. Le misure di efficienza quantica sono state effettuate a valori di tensione di polarizzazione di 37, 39 e 43 V. In tabella 3 sono riportati i risultati ottenuti. In figura 7 sono riportate le curve di efficienza quantica di SPAD a differenti valori di sovratensione. Anche per questo dispositivo si ha il massimo a 550 nm.

- *SPAD, SING – MIN, 50 μm:*

Si è trovato un valore di tensione di rottura pari a 30.9 V. In tabella 4 si possono osservare i valori di efficienza quantica misurati, mentre in figura 8 tali valori sono stati riportati in grafico.

Le misure effettuate indicano che anche gli SPAD con diametro di area attiva di 50 μm hanno un massimo di efficienza a 550 nm. Polarizzando il dispositivo a 43 V il valore massimo di efficienza di rivelazione è del 64 %.

Lambda [nm]	QE [%] @ 37 V	QE [%] @ 39 V	QE [%] @ 43 V
350	6.31	7.21	9.20
400	10.16	11.64	14.78
450	16.44	19.05	24.37
500	30.75	34.61	42.19
550	34.68	38.77	45.96
600	33.27	37.82	44.30
650	29.42	33.29	39.76
750	20.03	22.35	25.84
800	15.26	16.66	19.47
850	11.10	11.95	14.20
900	7.12	7.78	9.142
950	4.18	4.56	5.33
1000	1.92	1.99	2.43
1050	1.09	1.35	1.61

Tabella 3: Valori di efficienza quantica fra 350 e 1050 nm di SPAD con diametro dell'area attiva di 20 μm, a differenti tensioni.

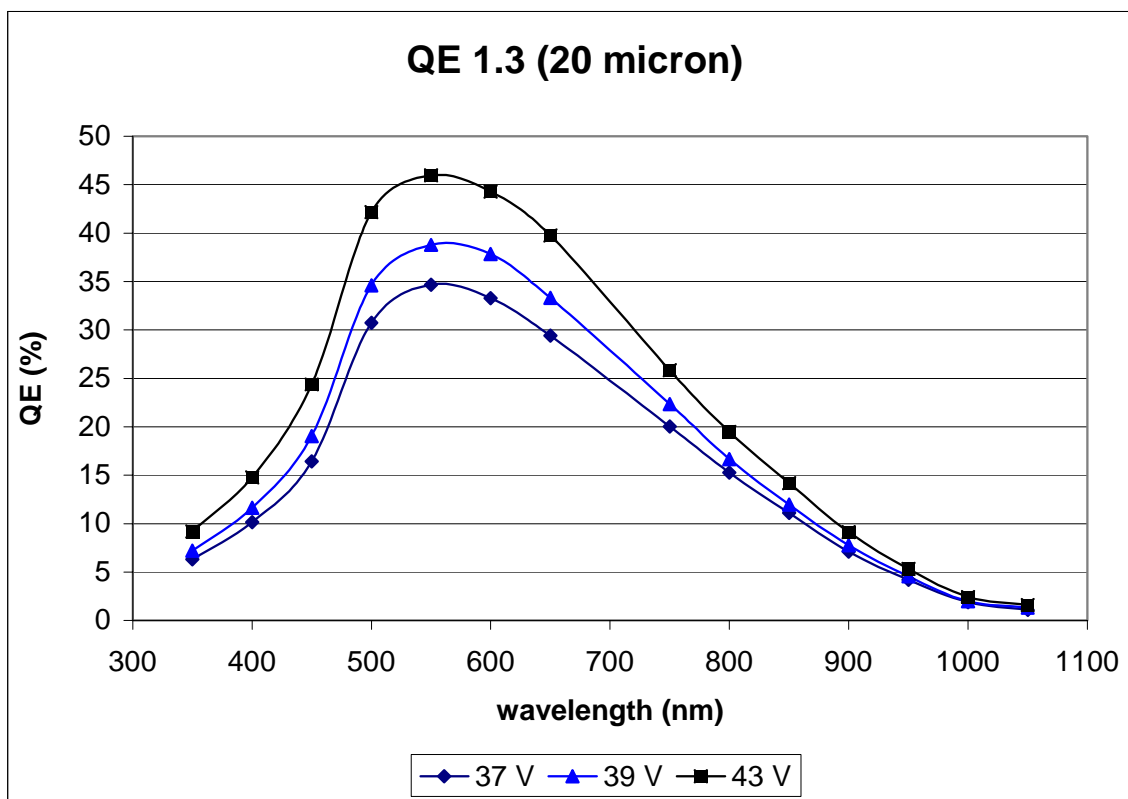


Figura 7: Curva di efficienza quantica di SPAD con diametro dell'area attiva di 20 μm , a differenti tensioni di polarizzazione.

Lambda [nm]	QE [%] @ 37 V	QE [%] @ 39 V	QE [%] @43 V
350	9.07	10.47	13.26
400	14.19	16.52	21.37
450	22.92	26.49	34.32
500	42.76	47.88	57.14
550	50.21	55.56	64.13
600	50.88	55.92	64.15
650	45.92	50.95	58.60
750	30.91	34.00	38.22
800	23.49	26.31	29.54
850	17.31	19.30	21.70
900	10.94	11.88	13.23
950	6.46	7.09	7.96
1000	2.94	3.25	4.04
1050	1.88	2.15	2.44

Tabella 4: Valori di efficienza quantica fra 350 e 1050 nm di SPAD con diametro dell'area attiva di 50 μm , a differenti tensioni.

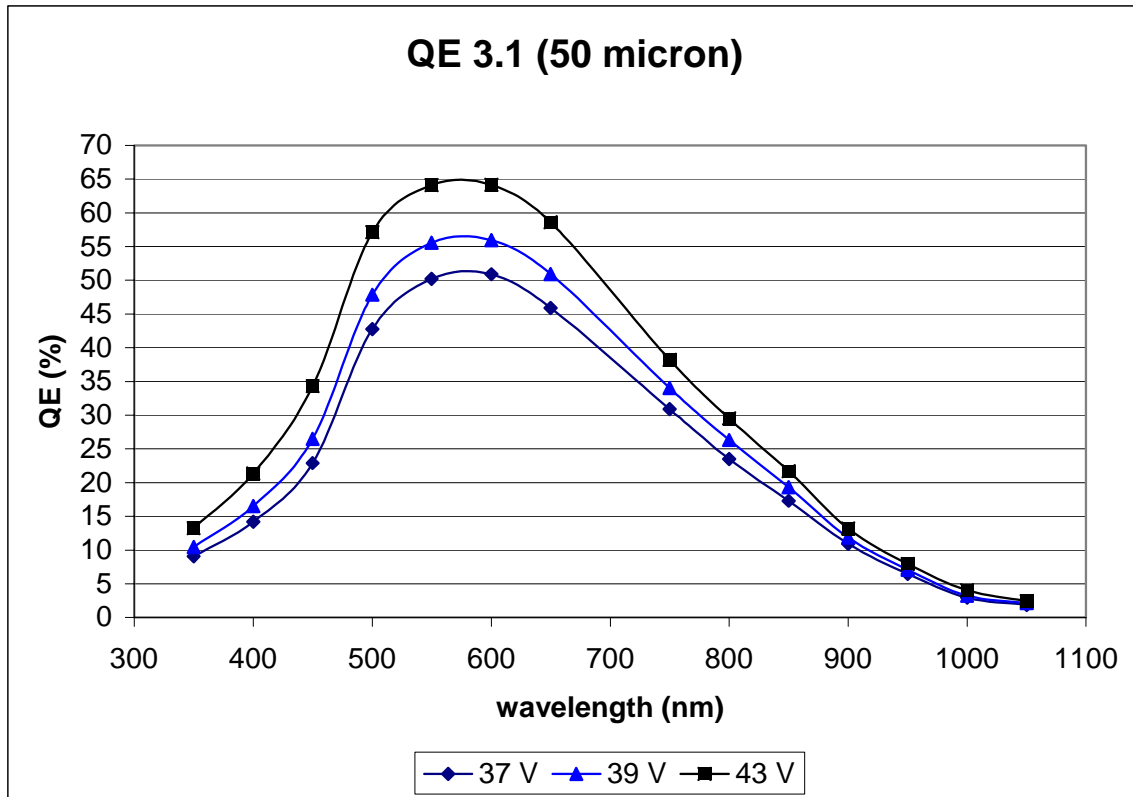


Figura 8: Curva di efficienza quantica di SPAD con diametro dell'area attiva di 50 μm , a differenti tensioni di polarizzazione.

- *SPAD, SING -MIN 100 μm :*

La tensione di breakdown è di 30.57 V; anche in questo caso le misure sono state condotte a tensioni di polarizzazione di 37, 39 e 43 V.

Di seguito vengono riportati i valori di efficienza quantica trovati; in figura 9 si può osservare il confronto fra le curve di efficienza quantica ai diversi valori di tensione di polarizzazione.

Lambda [nm]	QE [%] @ 37 V	QE [%] @ 39 V	QE [%] @43 V	QE [%] @43 V (misura ripetuta)
350	10.34	11.87	14.99	15.13
400	16.96	18.44	22.40	24.09
450	28.61	29.13	34.74	37.73
500	48.33	52.49	56.40	64.77
550	60.19	59.33	47.57	71.67
600	63.60	62.92	69.46	77.06
650	61.03	59.40	65.16	68.65
750	37.71	39.12	39.54	45.93
800	30.66	29.60	32.62	35.88
850	20	21.95	24.37	26.82
900	12.31	13.04	8.13	15.02
950	7.24	8.33	8.06	9.57
1000	3.40	3.83	4.086	4.60
1050	2.10	2.74	2.29	3.21

Tabella 5: Valori di efficienza quantica fra 350 e 1050 nm, a differenti tensioni, per SPAD con diametro dell'area attiva di 100 μm .

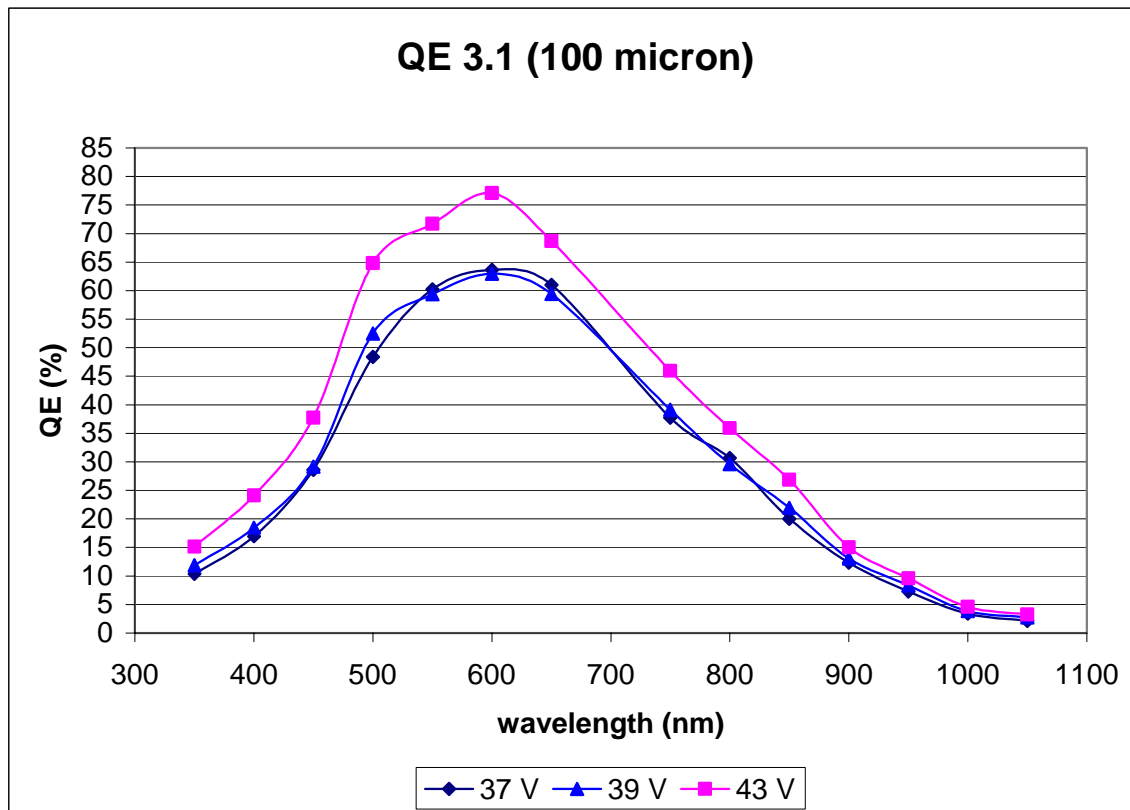


Figura 9: Curva di efficienza quantica di SPAD con diametro dell'area attiva di 100 μm , a differenti tensioni di polarizzazione.

Analizzando i risultati ottenuti si è visto che, l'efficienza quantica, per ciascun campione, è massima ad una lunghezza d'onda di 550 nm, inoltre aumenta, all'aumentare del diametro dell'area attiva di SPAD. Questo andamento è del tutto inatteso in quanto i valori mostrati nelle tabelle precedenti sono normalizzati rispetto all'area attiva del dispositivo: ci si aspetterebbe la stessa efficienza quantica per tutti gli SPAD presi in esame. Si potrebbe spiegare ciò ipotizzando che l'area sensibile di SPAD non coincide con tutta l'area attiva. La zona non sensibile ha un'area significativa nel caso di campioni piccoli e diviene trascurabile passando a dispositivi via via più grandi. Si procederà ad effettuare ulteriori analisi al fine di verificare la suddetta ipotesi.

Le misure di efficienza quantica sono state ripetute a due diversi valori di sovratensione: + 10 % e +20 % rispetto al breakdown. Nelle tabelle 6 e 7 sono riportati, rispettivamente, i valori di efficienza quantica, nel range 350 – 1050 nm, di SPAD a diverso diametro dell'area attiva. Tali valori sono normalizzati rispetto all'area attiva di ciascun campione. In figura 10 e 11 si può osservare il confronto fra le curve di efficienza quantica per SPAD con diverso diametro dell'area attiva ai valori di tensione sopra detti.

Questo ulteriore set di misure ha confermato che l'efficienza quantica è maggiore nei dispositivi più grandi.

Wavelength nm	QE % (10 μm)	QE % (20 μm)	QE % (50μm)	QE % (100 μm)
350	1.98	3.13	4.80	5.38
400	2.14	3.59	5.06	5.75
450	6.08	9.66	13.41	14.81
500	11.52	19.38	26.84	29.64
550	12.83	23.01	33.88	38.33
600	11.25	22.93	34.66	39.96
650	8.99	19.42	30.21	35.42
750	5.35	12.48	19.86	23.14
800	3.87	9.41	15.02	17.40
850	2.54	6.76	10.68	12.49
900	1.73	4.17	6.72	7.69
950	1.01	2.392	3.86	4.46
1000	0.51	1.08	1.74	2.05
1050	0.32	0.71	1.13	1.27

Tabella 6 - V_{pol} = BV + 10%

Wavelength nm	QE % (10 μm)	QE % (20 μm)	QE % (50 μm)	QE % (100 μm)
350	3.06	5.27	7.71	8.92
400	3.41	5.94	8.35	9.55
450	9.44	14.60	19.92	22.05
500	16.86	27.41	37.25	41.09
550	18.45	32.34	46.17	52.73
600	16.39	31.66	46.51	53.66
650	12.77	26.99	40.92	46.93
750	8.01	17.03	26.43	30.30
800	6.13	12.95	20.00	23.06
850	4.11	9.17	14.25	16.23
900	2.57	5.80	8.91	10.34
950	1.45	3.29	5.14	5.85
1000	0.64	1.48	2.28	2.63
1050	0.46	1.03	1.30	1.60

Tabella 7 - Vpol = VB + 20%

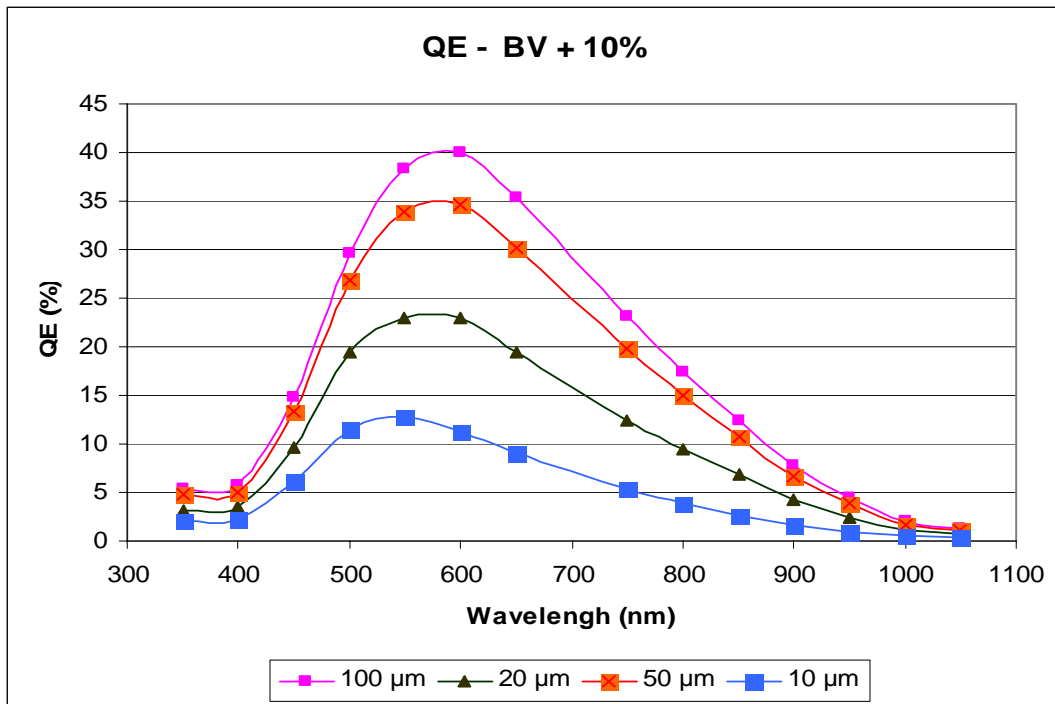


Figura 10: Confronto fra le curve di efficienza quantica di SPAD con diverso diametro dell'area attiva ad una sovratensione di + 10 % rispetto al breakdown.

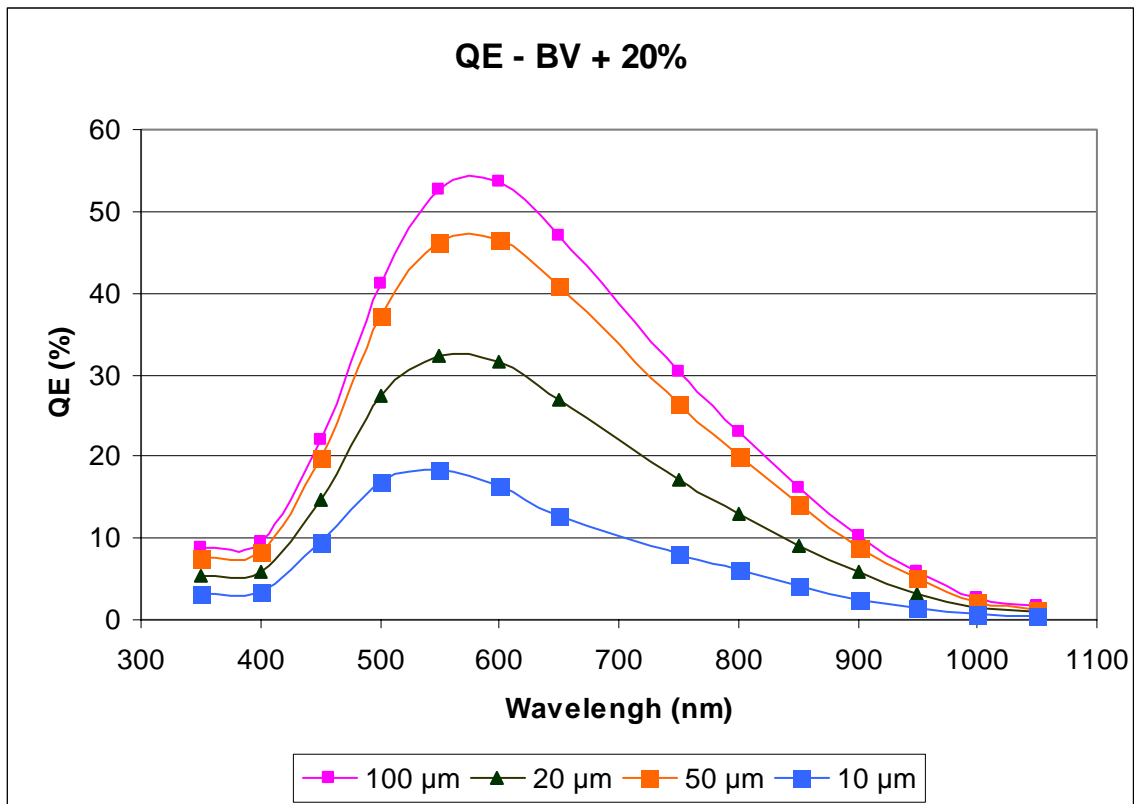


Figura 11: Confronto fra le curve di efficienza quantica di SPAD con diverso diametro dell'area attiva ad una sovratensione di + 20 % rispetto al breakdown.

ANDAMENTO DELL'EFFICIENZA QUANTICA CON IL CAMPO ELETTRICO

Le misure mostrate nei paragrafi precedenti hanno indicato che la lunghezza d'onda in corrispondenza della quale l'efficienza quantica di SPAD è massima risulta essere 550 nm. Quindi si è indagata la dipendenza di tale valore dall'intensità del campo elettrico, ossia dalla tensione di polarizzazione applicata. Le misure sono state effettuate a tensioni comprese fra 37 e 45 V. È stato misurato anche, per ciascun valore di tensione e per ciascun dispositivo, il numero di conteggi di buio.

- *SPAD SING - MIN, Diametro dell'area attiva: 10 μm:*

In tabella 8 sono riportati i valori di efficienza quantica, normalizzati rispetto all'area attiva del dispositivo, e i dark counts. L'andamento dell'efficienza quantica con la tensione di polarizzazione è mostrato in figura 12. Anche il numero di conteggi di buio aumenta con la tensione di polarizzazione.

Tensione di polarizzazione [V]	QE [%] @ 550 nm	Dark Counts [cps]
36.87	12.96	6.2
40	18.25	8.2
41	19.82	12.2
42	21.64	10.4
43	21.10	14.8
44	22.75	18

Tabella 8: Valori di efficienza quantica a 550 nm, a differenti tensioni.

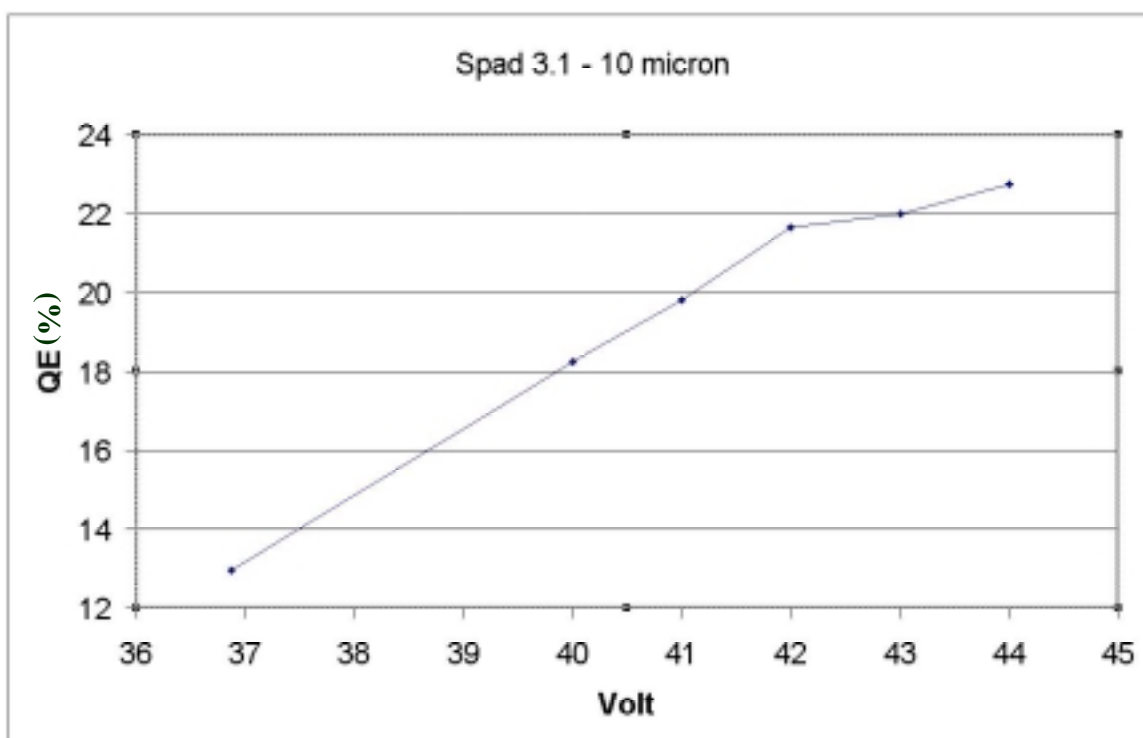


Figura 12: Efficienza di rivelazione di SPAD 10 μm al variare della tensione di polarizzazione.

- SPAD SING - MIN, Diametro dell'area attiva: 50 μm:

In tabella 9 vi sono i valori, normalizzati rispetto all'area, di efficienza quantica a 550 nm, per dispositivi con diametro dell'area attiva di 50 μm; in figura 13 è mostrato l'andamento dei valori di efficienza quantica in funzione della tensione di polarizzazione.

Tensione di polarizzazione [V]	QE [%] @ 550 nm	Dark Counts [cps]
--------------------------------	-----------------	-------------------

Tensione di polarizzazione [V]	QE [%] @ 550 nm	Dark Counts [cps]
33.97	32.23	1682
36	41.22	2290
38	47.16	2759
40	51.06	3167.4
42	56.25	3634
44	59.19	4038
45	61.12	4120

Tabella 9: Valori di efficienza quantica a 550 nm, a differenti tensioni.

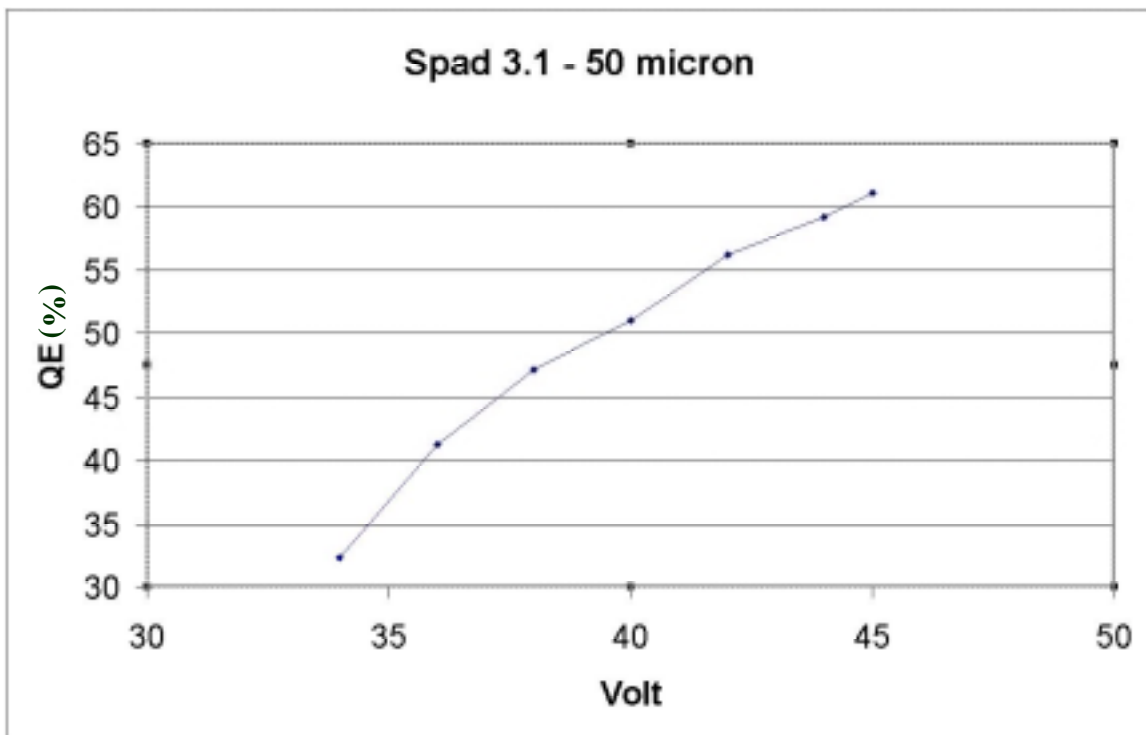


Figura 13: Efficienza di rivelazione di SPAD 50 μm al variare della tensione di polarizzazione.

- SPAD SING - MIN, diametro dell'area attiva: 100 μm:

In tabella 11 è possibile osservare i valori di efficienza quantica di SPAD SING- MIN, con diametro dell'area attiva di 100 μm, in un range di tensioni compreso fra 33 e 45 V. Sono anche riportati i dark counts ottenuti nelle stesse condizioni sperimentali. Il trend (figura 14) è quello visto nei campioni precedenti.

Tensione di polarizzazione [V]	QE [%] @ 550 nm	Dark Counts [cps]
33.67	39.35	5999.8
37	54.33	9760
38	57.87	10890
39	60.12	12110
40	63.02	13450
41	65.34	15070
42	68.72	16880
43	71.61	19390
44	73.96	21900
45	66.26	24562

Tabella 10: Valori di efficienza quantica a 550 nm, a differenti tensioni.

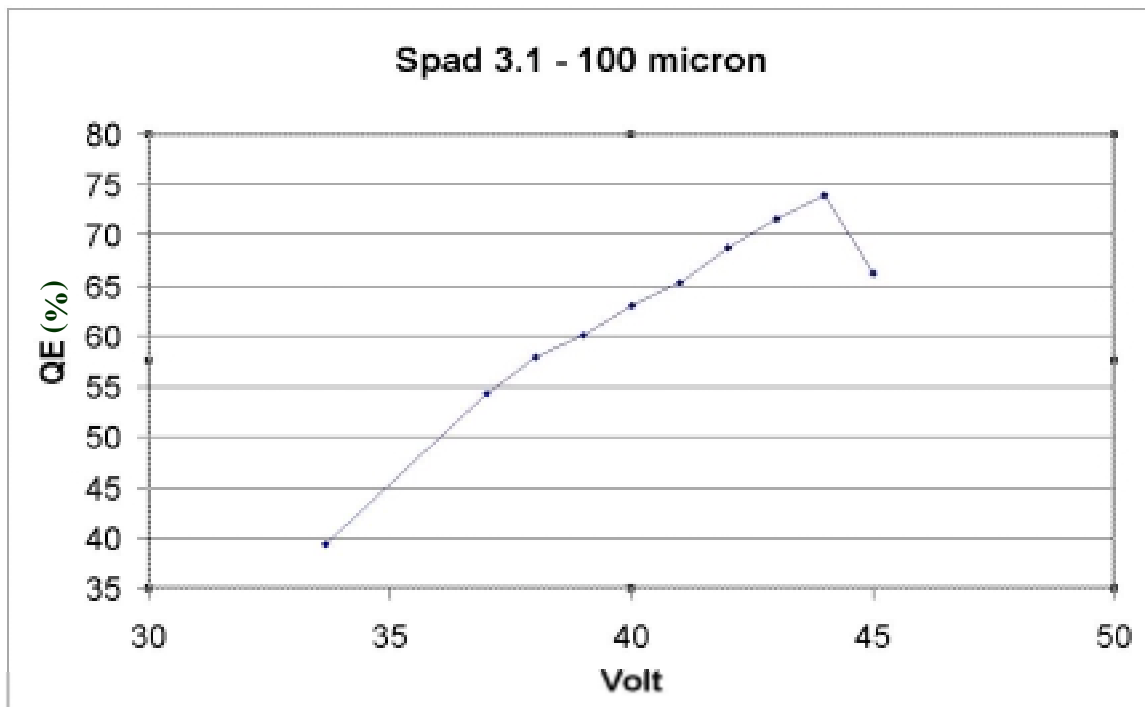


Figura 14: Efficienza di rivelazione, a 550 nm, di SPAD 100 μm al variare della tensione di polarizzazione.

Di seguito è mostrato (figure 15, 16, 17) l'andamento del numero di conteggi di buio al variare della tensione applicata, per i campioni in esame.

Tale andamento è giustificato dal fatto che all'aumentare dell'intensità del campo elettrico, aumenta la velocità di emissione dai centri di generazione e, conseguentemente, la generazione termica dai livelli più profondi (dark counts).

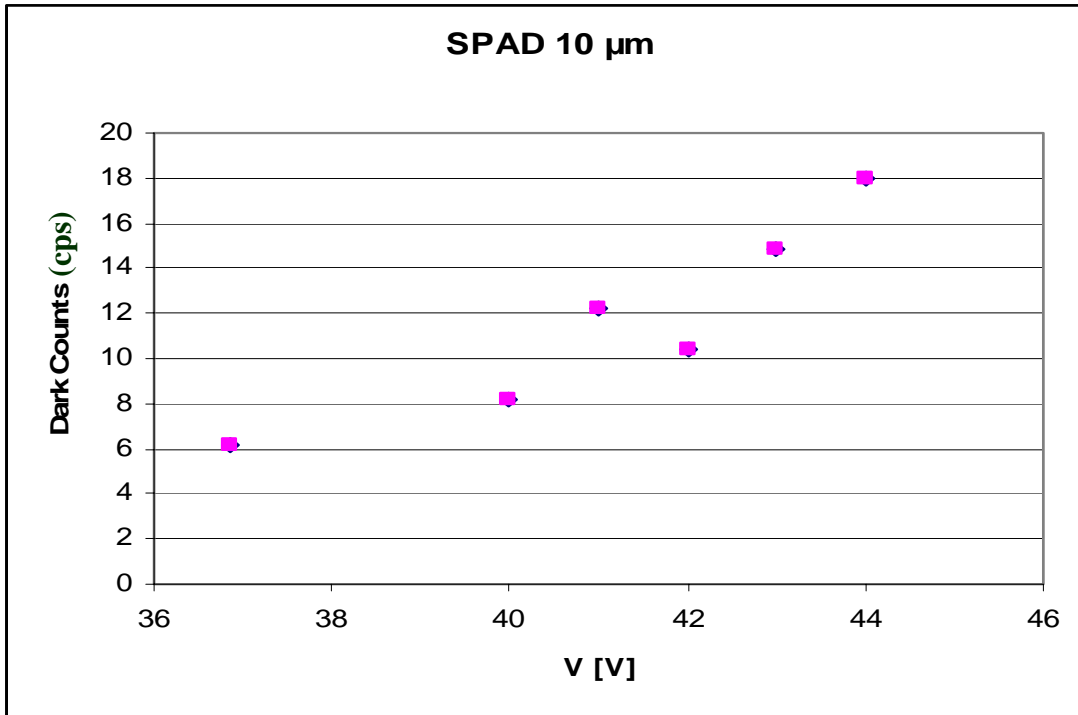


Figura 15: Dark Counts in funzione della tensione di polarizzazione per SPAD con diametro dell'area attiva di 10 μm .

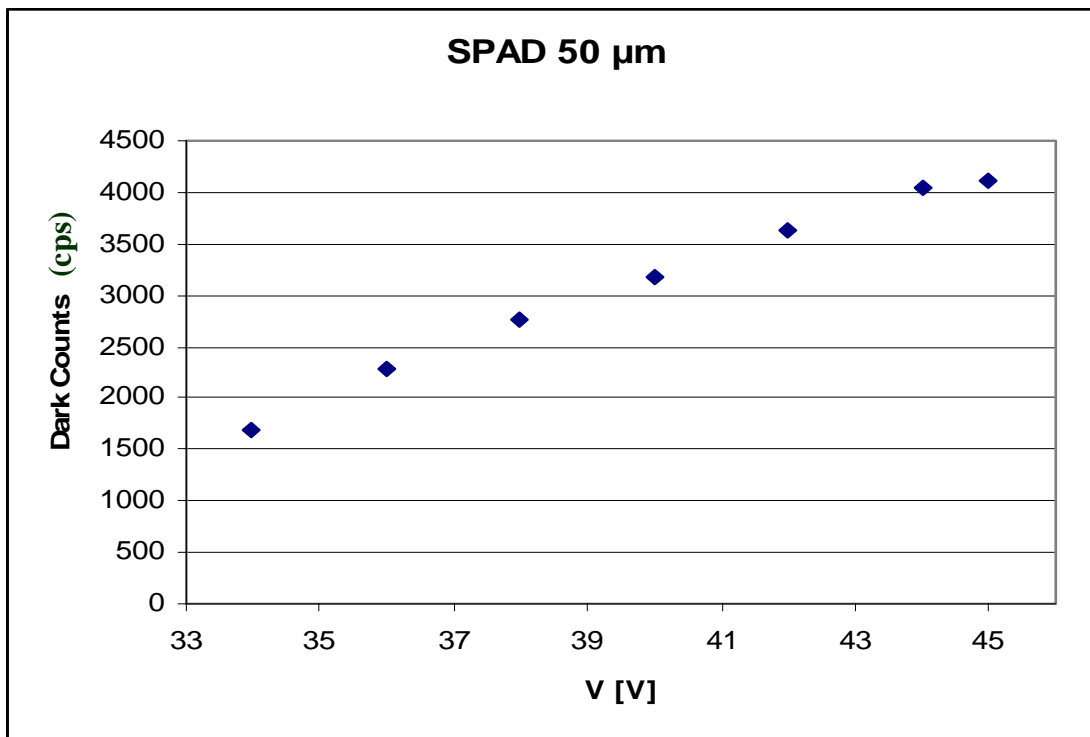


Figura 16: Dark Counts in funzione della tensione di polarizzazione per SPAD con diametro dell'area attiva di 50 μm .

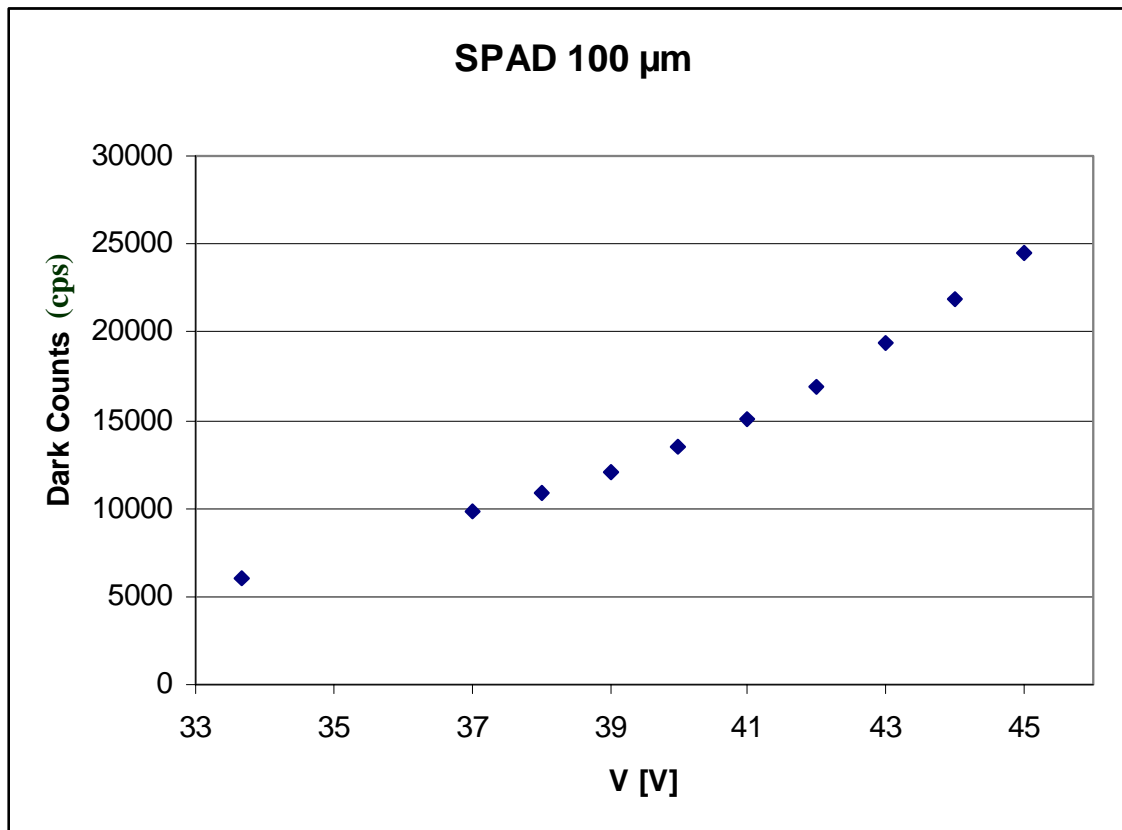


Figura 17: Dark Counts in funzione della tensione di polarizzazione per SPAD con diametro dell'area attiva di 100 μm .

LINEARITA'

Determinata l'efficienza quantica di SPAD, importante è studiarne la linearità di risposta al variare dell'intensità della radiazione incidente. Per variare l'intensità del fascio luminoso incidente sono stati utilizzati filtri neutri. Le misure sono state condotte su dispositivi con diametro dell'area attiva di 20, 50, 100 μm alla tensione di polarizzazione indicata ed una lunghezza d'onda di 550 nm. Nelle tabelle seguenti vengono riportati i valori di efficienza quantica ottenuti al variare della corrente del fotodiode, i conteggi misurati ed i conteggi effettivi. Quest'ultimi tengono conto del fatto che quando la rate di fotoni è alta, diventa probabile che un fotone incida sullo SPAD mentre questo è in fase di reset. La formula utilizzata per determinare i conteggi effettivi è la seguente:

$$C_e = \frac{C_m}{1 - C_m \cdot t_h}$$

ove:

C_e sono i conteggi effettivi, C_m i conteggi misurati e t_h il tempo di hold off che nel nostro caso è pari a 360 ns.

L'efficienza quantica dei dispositivi è pressochè costante, indipendentemente dall'intensità del fascio luminoso incidente.

Fotodiodo (pA)	Counts misurati (cps)	Counts effettivi (cps)	QE (%)	Deviazione linearità'
1072	6650	6666	22.526	1.004
911	5650	5666	22.521	1.004
467	2850	2853	22.161	0.986
122	760	760	22.621	1.006

Tabella 11 - spad 3.1 – 20 µm (V=34.48)

Fotodiodo (pA)	Counts misurati (cps)	Counts effettivi (cps)	QE (%)	Deviazione linearità'
1081	9542	9575	32.053	0.991
906	8112	8136	32.513	1.005
465	4162	4168	32.502	1.003
122	1092	1092	32.503	1.001

Tabella 12 - spad 3.1 –20 µm (V=37.62)

Fotodiodo (pA)	Counts misurati (cps)	Counts effettivi (cps)	QE (%)	Deviazione linearità'
1070	82350	84866	44.716	1.002
906	70150	71967	44.986	1.003
464.7	36200	36678	45.260	0.997
122	9600	9633	45.718	0.997

Tabella 13 - spad 3.1 - 50 µm (V=37.15)

Fotodiodo (pA)	Counts misurati (cps)	Counts effettivi (cps)	QE (%)	Deviazione linearità'
1073	351000	401767	47.515	1.012
463	161500	171469	50.665	1.001
122	44500	45225	52.981	1.002
13.2	4800	4808	52.819	0.985

Tabella 14 - spad 3.1 - 100 µm (V=36.73)

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati presentati i valori di efficienza quantica di SPAD. Le misure sono state effettuate a diversi valori di tensione di polarizzazione, in una finestra spettrale compresa fra 350 nm e 1050 nm; sono stati presi in esame dispositivi con differente diametro dell'area attiva. Si è visto che la lunghezza d'onda in corrispondenza della quale l'efficienza quantica è massima risulta essere 550 nm. L'efficienza quantica aumenta, all'aumentare del diametro dell'area attiva di SPAD. Si potrebbe spiegare ciò ipotizzando che l'area sensibile di SPAD non coincide con tutta l'area attiva. La zona non sensibile ha un'area significativa nel caso di campioni piccoli e diviene trascurabile passando a dispositivi via via più grandi. SPAD avente diametro dell'area attiva di 50 μm esibisce una efficienza quantica di circa il 50 %. E' questo un valore particolarmente elevato se si considera che i nostri dispositivi sono SPAD a giunzione sottile.

BIBLIOGRAFIA

- *D. Sanfilippo, C. Di Franco*, R. T. G0401-0004
- *A. Morea* R. T. G0401-0005
- *S. Marchese, D. Sanfilippo, A. Rundo* R. T. G0401-0006
- *C. Di Franco, E. Sciacca*, R. T. G0401-0011
- *S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori and F. Zappa* *Applied Optics*, Vol. 35, No. 12, pagg. 1956-1976 (1996).
- *A. Spinelli and A. Lacaita*, *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. 44, No. 11, pagg. 1931-1943 (1997).
- *G. Bonanno, P. Bruno, R. Cosentino, F. Bortoletto, M. D'Alessandro, D. Fantinel, A. Balestra, P. Mancucci*, *IAU 167 Proceedings*, p. 319 (1995).
- *G. Bonanno, P. Bruno, A. Calì, R. Cosentino, R. di Benedetto, M. Puleo, S. Scuderi* *SPIE Proceedings* vol. 2808, p. 242 (1996).
- *F. Bortoletto, C. Bondi, M. D'Alessandro, G. Fariseto, G. Bonanno, P. Bruno, A. Calì, R. Cosentino, G. Bregoli, M. Comari*, *SPIE Proceedings* vol. 2654, p. 248 (1996).