

LAB Foto voltaico

cluster
Energie rinnovabili in Sardegna

La Filiera Fotovoltaica e le varie tipologie di pannelli fotovoltaici

prof. ing. Alfonso Damiano
alfio@diee.unica.it

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministratori ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 1

LAB Foto voltaico

La cella fotovoltaica è l'elemento base per la realizzazione di un sistema fotovoltaico

La cella fotovoltaica è un diodo di grande superficie, che esposto alla radiazione solare si comporta come un generatore di corrente.

Quali sono i materiali che possono essere utilizzati per realizzare una cella fotovoltaica?



Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministratori ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 2

LAB Foto voltaico

I materiali utilizzati per la realizzazione delle celle fotovoltaiche devono possedere caratteristiche fisiche ben precise:

- Devono avere caratteristiche semiconduttive
- Devono possedere un energy gap compresa nel campo in cui la radiazione solare presenta la massima intensità (1-1.5 eV)
- Devono possedere un'alto coefficiente di assorbimento (10^4 - 10^5 cm^{-1}) della radiazione nel campo in cui la radiazione solare presenta la massima intensità (350-1000nm)
- Bassa velocità di ricombinazione
- Un lungo percorso di diffusione
- Deve essere facilmente reperibile
- Abbondante in natura

Uno dei materiali che rispetta tutte queste caratteristiche è il silicio

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministratori ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

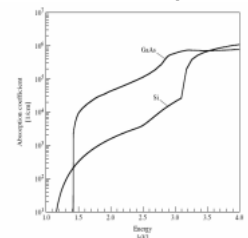
SARDEGNA RICERCHE 3

LAB Foto voltaico

Caratteristiche del silicio cristallino:

- Il Silicio è un semiconduttore
- Il silicio ha un energia di banda (energy gap) pari a 1.1 eV compresa nel campo in cui la radiazione solare presenta la massima intensità (1-1.5 eV)
- Presenta un coefficiente di assorbimento relativamente basso (10^4 - 10^5 cm^{-1}) della radiazione nel campo in cui la radiazione solare presenta la massima intensità (350-1000 nm)

Ciò costringe ad aumentare lo spessore per poter aumentare l'assorbimento della radiazione
Spessore superiore a 50 μm



Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministratori ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 4

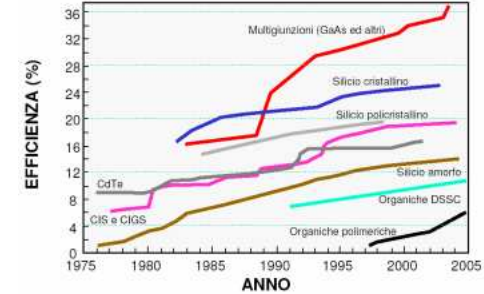
Materie fotovoltaici:

I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te

Composti binari del III-V gruppo
Es: AsGa
Composti binari II-VI gruppo
Es: TeCd

Questi composti presentano una struttura cristallina (zincoblende) simile da quella del silicio (struttura a diamante)

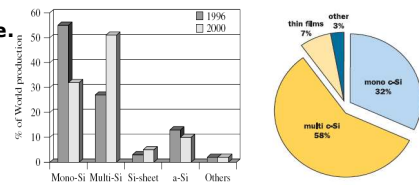
Efficienze massime ottenute in laboratorio su celle di piccole dimensioni



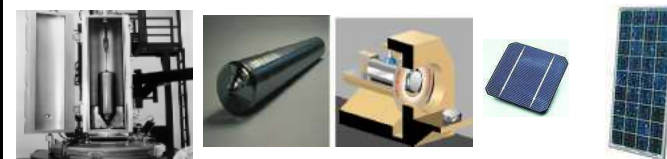
Tipologia di Pannelli Fotovoltaici

Le tecnologie di produzione delle celle fotovoltaiche si dividono sostanzialmente in tre famiglie:

- **Silicio cristallino:** che comprende il monocristallo e il policristallo.
- **Film sottile:** l'amorfo tradizionale, i sistemi eterogiunzione
- **Multigiunzione.**



Catena di produzione del pannello fotovoltaico



LAB Foto voltaico

Caratteristiche chimiche del Silicio Metallurgico

Element	O	Fe	Al	Ca	C	Mg	Ti	Mn	V	B	P
Low (ppm)	100	300	300	20	50	5	100	10	1	5	5
High (ppm)	5000	25000	5000	2000	1500	200	1000	300	300	70	100

Purezza del 97-99%

Caratteristiche elettriche del Silicio per applicazioni PV

Property	Specification
Resistivity	Higher than 1 ohmcm, p-type
Minority-carrier lifetime	Higher than 25 μs

Caratteristiche chimiche limite del Silicio per applicazioni PV

Impurity	Specification
Fe, Al, Ca, Ti, metallic impurities	Less than 0.1 ppm(w) each
C	Less than 4 ppm(w)
O	Less than 5 ppm(w)
B	Less than 0.3 ppm(w)
P	Less than 0.1 ppm(w)

Purezza del 99,9999%

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 9

LAB Foto voltaico

Diagramma di Flusso del processo di produzione

```

    graph TD
      subgraph CHEMICAL_ROUTE [CHEMICAL ROUTE]
        Q1[Quartz] --> R1[Reduction in the presence of carbon]
        R1 --> SM1[Si-Metallurgical]
        SM1 --> P1[Purification: reactions with HCl and H2]
        P1 --> PS1[Production of solar cells]
        PS1 --> SPM1[Solar Panels and Modules]
      end
      subgraph METALLURGICAL_ROUTE [METALLURGICAL ROUTE]
        Q2[Quartz] --> R2[Reduction in the presence of carbon]
        R2 --> SM2[Si-Metallurgical]
        SM2 --> P2[Purification: controlled fusion, refusion and solidification]
        P2 --> PS2[Production of solar cells]
        PS2 --> SPM2[Solar Panels and Modules]
      end
      R1 --- E1[Emission of CO and silica]
      R2 --- E1
      P1 --- E2[Emission of Cl2 and production of chlorosilanes]
      P2 --- E2
      PS1 --- E3[Handling of toxic elements]
      PS2 --- E3
      SPM1 --- E4[Use of toxic compounds in the manufacture of panels, Environmental policy for discarding batteries.]
      SPM2 --- E4
  
```

Fonte: A.F.B. Braga et aliter: "New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon" Solar energy material and solar Cells

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 10

LAB Foto voltaico

Produzione di silicio di tipo metallurgico

$$\text{SiO}_2(\text{s}) + 2\text{C}(\text{s}) = \text{Si}(\text{l}) + 2\text{CO}(\text{g})$$

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 11

LAB Foto voltaico

Processo Siemens

Principali Reazioni

$$2\text{SiHCl}_3 = \text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{SiCl}_4$$

$$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 = \text{Si} + 2\text{HCl}$$

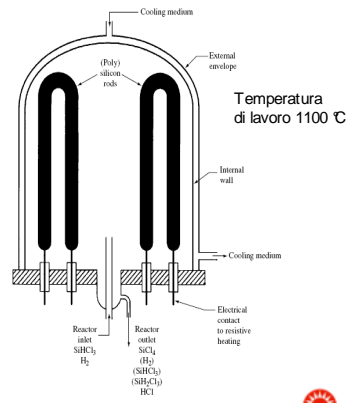
$$\text{H}_2 + \text{HSiCl}_3 = \text{Si} + 3\text{HCl}$$

$$\text{HCl} + \text{HSiCl}_3 = \text{SiCl}_4 + \text{H}_2$$

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

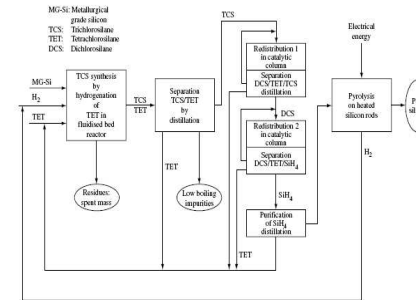
SARDEGNA RICERCHE 12

Reattore Siemens



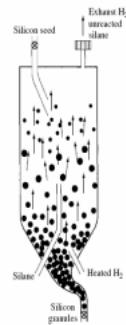
Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

Processo Union Carbide



Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

Evoluzione Processo Union Carbide F BR



Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009



Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

LAB Foto voltaico

Valori attuali e attesi di produzione di Polysilicon nel mondo

LEGENDA:
 Serie 1: capacità produttiva fine 2005 (Mondo 32.000 t)
 Serie 2: capacità produttiva entro 2008 (Mondo 53.000 t)
 Serie 3: capacità produttiva entro 2010 (Mondo 72.000 t)

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 17

LAB Foto voltaico

Caratteristiche Fisiche del silicio

Property	Value
Atomic weight	28.085
Atomic density (atoms/cm ³)	5.0×10^{23}
Melting point (°C)	1410
Boiling point (°C)	2355
Density (g/cm ³ at 25°C)	2.329
Heat of fusion (kJ/g)	1.8
Heat of vaporisation at MP (kJ/g)	16
Volume of contraction on melting (%)	9.5

Il consumo di silicio nel caso di pannelli a silicio cristallino è di circa 10 - 20 g/W contro i 0,1-0,4 g/W nel caso del silicio amorfo

Production capacities by the end of 2010

Silicon	8-10 GWp
Wafer	10-12 GWp
Cells	11-14 GWp
c-Si Modules	14-16 GWp
Thin Film	4 GWp

Fonte EPIA: European Photovoltaic Industry Association

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 18

LAB Foto voltaico

Analisi di Mercato della materia prima (polysilicon)

Fonte EPIA: European Photovoltaic Industry Association

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 19

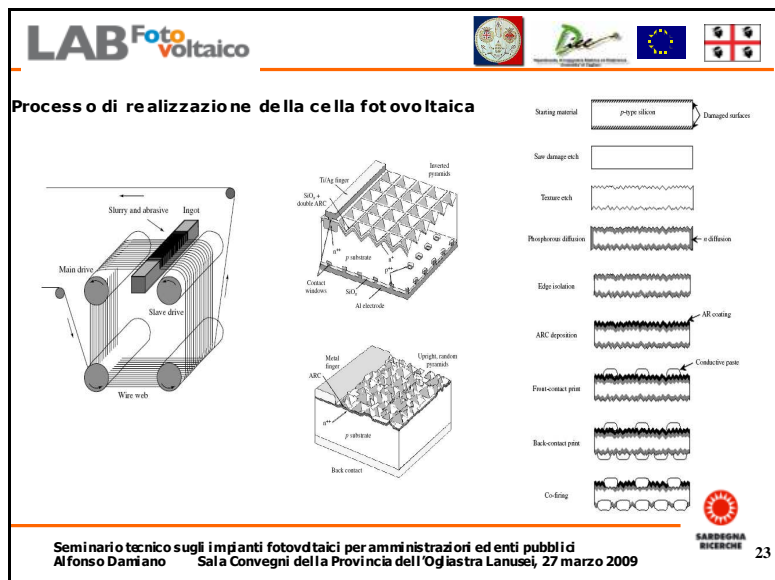
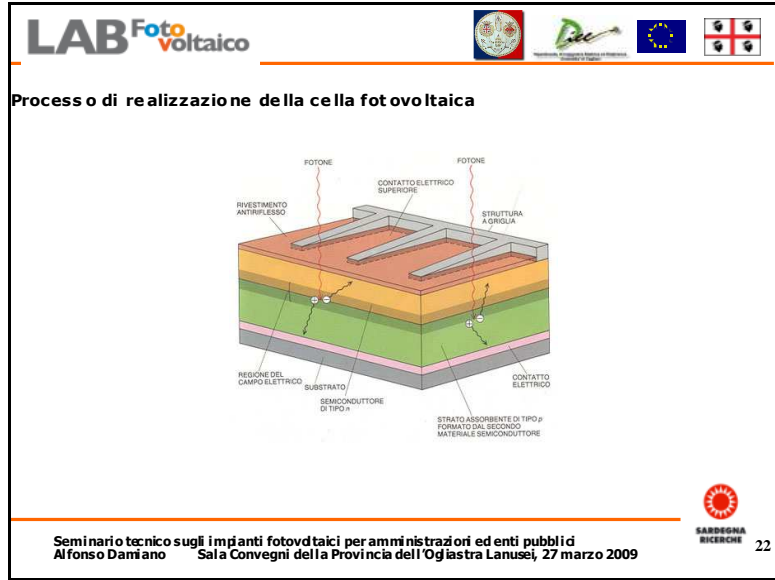
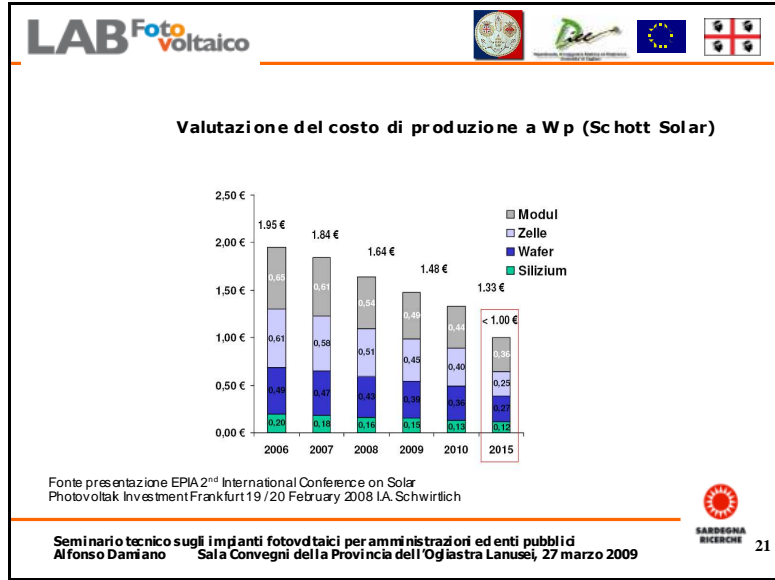
LAB Foto voltaico

Energy Pay Back per i impianti fotovoltaici (fonte DOE)

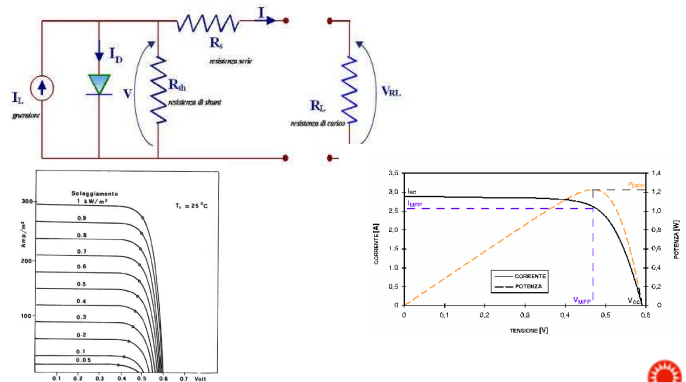
Energy Pay Back:
 Tempo di funzionamento dell'impianto necessario a produrre la stessa quantità energia utilizzata per la sua realizzazione.
 Consumo energetico per produrre le celle monocristalline 600 kWh/m² 420 kWh/m² per il policristallino.

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 20

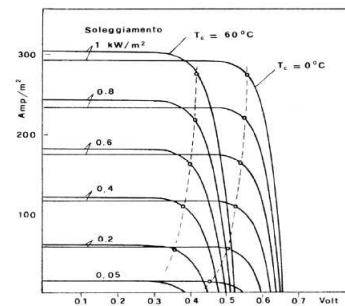


Problematich e delle connessioni delle celle fotovoltaiche



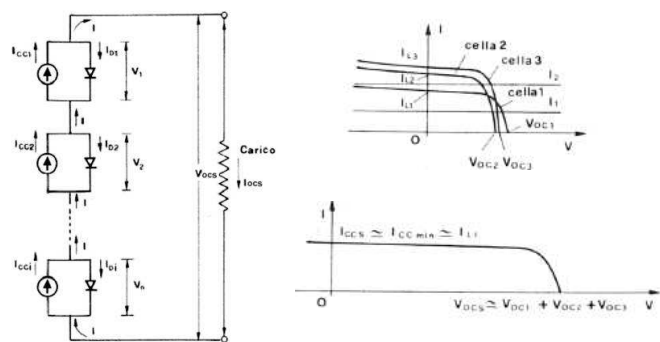
Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

Problematich e delle connessioni delle celle fotovoltaiche



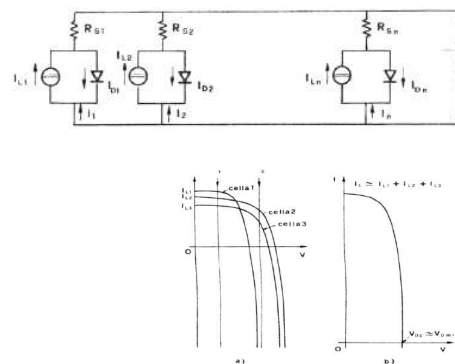
Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

Problematich e delle connessioni delle celle fotovoltaiche: collegament o serie



Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

Problematich e delle connessioni delle celle fotovoltaiche: collegament o parallel o



Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

LAB Foto voltaico

Modulo (PV-040161)	
Capacità	200
Potenza nominale (P _{max}) (W)	200
Spessore del substrato (mm) (D)	47.3
Costante di moltiplicazione (K _m)	1.20
Temperatura di esercizio (T _{cell}) (°C)	30.0
Costante di moltiplicazione (K _t)	1.87
Potenza nominale (P _{max}) (W)	198.9
Massa del pannello (kg)	1.8
Temperatura di esercizio (T _{cell}) (°C)	30.0
Temperatura di esercizio (T _{amb}) (°C)	20.0
Coefficiente della serie di P _{max} (K _s)	-0.30
Velocità del vento (m/s)	1.67
Velocità del vento (m/s)	1.68

Note: 1. Condizioni standard: Irradiazione 1.000 W/m², temperatura dell'aria a 25 °C.
 Note: 2. I dati della scheda tecnica sono solo orientativi.

Dependenza dall'irraggiamento

Dependenza dalla temperatura

Certificati: IEC 61730 IEC 61215

CE, IEC, TÜV, SUDAS, SARDIGNA RICERCHE

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDIGNA RICERCHE 29

LAB Foto voltaico

La NOCT è definita come la temperatura di equilibrio media di giunzione di una cella di un modulo montato su un telaio all'aperto nelle seguenti condizioni ambientali di riferimento:

- angolo di inclinazione: Incidenza normale del raggio solare diretto al mezzogiorno locale;
- irraggiamento globale: 800 W · m⁻²
- temperatura ambiente: 20 °C
- velocità del vento: 1 m·s⁻¹
- carico elettrico: nessuno (circuito aperto).

La NOCT può essere usata dal progettista di sistema come una guida al fine di determinare la temperatura di esercizio in campo del modulo fotovoltaico. Essa costituisce pertanto un parametro utile per effettuare il confronto fra le prestazioni di moduli di progetto differente.

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDIGNA RICERCHE 30

LAB Foto voltaico

Come effettuare una valutazione sulla qualità del pannello?

Esistono Enti accreditati che svolgono attività di valutazione e analisi del prodotto e dell'impianto.

Tra questi voi sono le Università, i centri di ricerca e di certificazione.

Vi sono anche delle istituzioni private che svolgono attività di analisi e valutazione.

Un esempio interessante è ENF è un'azienda specializzata nell'informazione relativa al settore fotovoltaico che effettua ricerche di mercato e ha una data base delle aziende fotovoltaiche disponibili presso il sito internet www.enf.cn

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDIGNA RICERCHE 31

LAB Foto voltaico

Perché la certificazione è importante

IEC 61215 Ed. 2 (2005)	Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval
IEC 61646 Ed. 1 (1996)	Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval
IEC 61730-1 Ed. 1 (2004)	Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 1: Requirements for construction
IEC 61730-2 Ed. 1 (2004)	Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing

CE

Fonte presentazione EPIA 2nd International Conference on Solar Photovoltaic Investment Frankfurt 19 / 20 February 2008 TÜV Rheinland Immissionschutz

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
 Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDIGNA RICERCHE 32

LAB Foto voltaico

Test sequences of IEC 61215 Ed. 2

Fonte presentazione EPIA 2nd International Conference on Solar Photovoltaik Investment Frankfurt 19/20 February 2008 TÜV Rheinland Immissionsschutz

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 33

LAB Foto voltaico

Environmental stress tests

Damp heat:
1000 hours
85 °C, 85% RH

Thermal cycling:
200 cycles
-40 °C to 85 °C
with current injection

Fonte presentazione EPIA 2nd International Conference on Solar Photovoltaik Investment Frankfurt 19/20 February 2008 TÜV Rheinland Immissionsschutz

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 34

LAB Foto voltaico

Mechanical stress tests:

Mechanical load test to determine the ability of the module to withstand wind, snow, static or ice loads.

- 3 load cycles to the module front and back surface
- Standard: 2.4 kN/m² uniform load
- Optional: 5.4 kN/m² during last front cycle

Fonte presentazione EPIA 2nd International Conference on Solar Photovoltaik Investment Frankfurt 19/20 February 2008 TÜV Rheinland Immissionsschutz

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 35

LAB Foto voltaico

Distribuzione del fallimento dei test di prove di certificazione pannelli

www.tuv.com

TÜVRheinland

Fonte presentazione EPIA 2nd International Conference on Solar Photovoltaik Investment Frankfurt 19/20 February 2008 TÜV Rheinland Immissionsschutz

Seminario tecnico sugli impianti fotovoltaici per amministrazioni ed enti pubblici
Alfonso Damiano Sala Convegni della Provincia dell'Ogliastra Lanusei, 27 marzo 2009

SARDEGNA RICERCHE 36

SILICIO AMORFO (a-Si:H) La tecnologia al silicio amorfo è oggetto di numerosi investimenti in ricerca e sviluppo.

E' sicuramente la tecnologia meno costosa e più semplice da produrre, ma anche quella che garantisce i rendimenti più bassi: 6 - 8%.

TECNOLOGIA SILICIO AMORFO MJ

Derivata dalla tecnologia a silicio amorfo (a-Si:H tradizionale) permette un maggior rendimento di funzionamento, il quale in alcuni casi arriva al 12% (triple junction).

Un modulo PV di tale generazione, paragonata al silicio cristallino C-Si, anche se caratterizzato da una minor efficienza determinata in condizioni standard, a parità di potenza riesce a produrre su base annua un 10% in più di energia.

TECNOLOGIA (CIS e CIGS)

film sottile: CIS sta avendo un grande successo grazie agli ultimi risultati ottenuti con la ricerca sul disselenuro di rame/indio.

I risultati ottenuti danno un 13-15% di rendimento su celle testate in laboratorio, mentre aggiungendo del Gallio (CIGS) questo valore, su celle di piccole dimensioni, può addirittura arrivare al 18%.

Attualmente il valore su celle industriali si attesta intorno al 10 - 11%. Si pensa che in futuro la tecnologia CIS potrà dare risultati equiparabili a moduli di egual misura e potenza costruiti con celle in silicio cristallino, ma con costi di produzione molto minori.

TECNOLOGIA Tellurio di Cadmio

Il CdTe è un semiconduttore caratterizzato da una band gap diretto, pari a 1,45 eV, e il suo coefficiente di assorbimento è abbastanza alto da consentire ad uno strato di materiale spesso 1 µm di assorbire il 99% della luce visibile.

Efficienza: 16,5% in laboratorio (cella solare), 9% (modulo commerciale)

Obiettivo 2008-2013: efficienza modulo commerciale 12%